

***Mareen Vaßholz***

***Systematik zur wirtschaftlichkeits-  
orientierten Konzipierung  
Intelligenter Technischer Systeme***

***Systematic Approach for the  
Economic-efficiency-oriented  
Conceptual Design for  
Intelligent Technical Systems***

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

©Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2015

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Satz und Gestaltung: Mareen Vaßholz

Hersteller: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG  
Druck · Buch · Verlag  
Bielefeld

Printed in Germany

## **Geleitwort**

Das Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn ist ein interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik. Unser generelles Ziel ist die Steigerung der Innovationskraft von Industrieunternehmen im Informationszeitalter. Ein Schwerpunkt des von mir vertretenen Fachgebiets „Strategische Produktplanung und Systems Engineering“ liegt auf der interdisziplinären Entwicklung von Intelligenten Technischen Systemen – dem sogenannten Systems Engineering.

Viele Unternehmen des Maschinenbaus und verwandter Branchen vollziehen mit ihren Produkten den Innovationssprung von mechatronischen hin zu Intelligenten Technischen Systemen. Derartige Systeme sind in der Lage sich autonom und flexibel an Veränderungen in ihrer Umgebung anzupassen. Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich. Diese Eigenschaften bergen das Potential die Wirtschaftlichkeit bestehender Systeme für den Kunden zu steigern. Es besteht jedoch die Herausforderung, dass einerseits durch ihre hohe Komplexität höhere Kosten und andererseits durch die Funktionalität Zusatznutzen für den Kunden generiert werden. Es gilt somit ein ausgeglichenes Verhältnis von Kosten und Nutzen dieser Systeme bereits in der frühen Entwicklung im Rahmen der Konzipierung sicherzustellen. Nur so lässt sich ein Erfolg am Markt und somit eine Innovation realisieren.

Vor diesem Hintergrund hat Frau Vaßholz eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung dieser Systeme entwickelt. Sie gliedert sich in ein fachdisziplinübergreifendes Vorgehen auf Basis des Systems Engineering ein. Den Kern der Systematik bildet ein konzeptuelles Wirtschaftlichkeitsmodell, welches den Aspekt der Wirtschaftlichkeit für das zu entwickelnde System abbildet. Zur Unterstützung bei der Modellierung wird eine Grundstruktur der Kosten und des Nutzens über den Lebenszyklus als Schablone bereitgestellt. Richtlinien und Bedingungen ermöglichen die Entwicklung eines plausiblen Wirtschaftlichkeitsmodells. Das Wirtschaftlichkeitsmodell kann somit von allen beteiligten Disziplinen gleichermaßen gelesen und verstanden werden. Zur Analyse und Bewertung der Wirtschaftlichkeit stellt die Systematik Methoden in einem Vorgehensmodell bereit. Insbesondere das Vorgehen zur frühzeitigen Analyse der Systemdynamik ermöglicht die Analyse und Bewertung der Kosten und des Nutzens intelligenter Technischer Systeme, welche aus ihrer situationsabhängigen Funktionalität resultieren. Die Systematik wurde an einem Demonstrator aus dem Sonderforschungsbereich 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ validiert.

Mit ihrer Arbeit liefert Frau Vaßholz einen signifikanten Beitrag zur Weiterentwicklung der interdisziplinären Entwicklungsmethodik für Intelligente Technische Systeme und somit des Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut.





# **Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme**

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Wirt.-Ing. Mareen Anna Verena Vaßholz  
aus Mettingen

Tag des Kolloquiums:	22. Mai 2015
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Strategische Produktplanung und Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut (HNI) der Universität Paderborn. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, der mich stets forderte und förderte. Die intensive Zusammenarbeit in anspruchsvollen Projekten und die damit verbundenen fachlichen Diskussionen, Anregungen und insbesondere konstruktive Kritik haben wesentlich zu meiner fachlichen und persönlichen Entwicklung beigetragen. Die übertragende Verantwortung und die Möglichkeit, verschiedene Projekte selbstständig ausgestalten und bearbeiten zu können waren außergewöhnlich.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktentwicklung der Technischen Universität München (TUM), danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls sowie der Fraunhofer Projektgruppe, insbesondere den Kollegen im Team Entwicklungsmethodik Mechatronik, danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit und den einzigartigen Teamgeist, der mich jederzeit motiviert hat. Besonders wertvoll war die intensive Zusammenarbeit mit Dr.-Ing. Volker Brink, Dominic Dettmer, Jörg Donoth, Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, Dr.-Ing. Niklas Echterhoff, Tobias Gaukster, Peter Iwanek, Anne-Christin und Dr.-Ing. Markus Lehner, Marina Wall und Olga Wiederkehr. Den vielen Studenten, die ich namentlich nicht alle nennen kann, danke ich für ihre Unterstützung als Studentische Hilfskraft oder durch ihre studentischen Abschlussarbeiten. Vielen Dank auch an die Kolleginnen und Kollegen aus dem Sonderforschungsbereich 614. Hervorheben möchte ich Sabine Illigen und Thomas Jäger, die mir als Geschäftsführerin mit ihrem unerbittlichen Einsatz den Rücken freigehalten haben.

Außerdem danke ich meinen Freundinnen und Freunden für die Zerstreuung in kreativen Schaffenspausen und ihre Freundschaft. Meinem Bruder Malte danke ich zudem für die stetige Motivation. Mein größter Dank gilt meinen Eltern Gabriele und Udo, die mir mein Studium erst ermöglicht haben und mich immer unterstützen. Sie haben mich gelehrt, dass ich alles erreichen kann. Vielen Dank!

Paderborn, im Mai 2015

Mareen Vaßholz



## Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [DGG+13] DOROCIAK, R.; GAUKSTERN, T.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.: A Methodology for the Improvement of Dependability of Self-optimizing Systems. *Production Engineering - Research and Development* 7(1), Springer-Verlag, Heidelberg, 2013, pp. 53-67
- [DGI+14] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.: From Mechatronic to Intelligent Technical Systems. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: *Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 2-5
- [GIV+14] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.; REINHART, F.: Selbstoptimierung im Maschinen- und Anlagenbau – Durch Selbstoptimierung intelligente technische Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus entwickeln. *Industrie Management* 30(2014), 2014, S. 51-54, *Status: angenommen*
- [GTV12] GAUSEMEIER, J.; TSCHIRNER, C.; VABHOLZ, M.: Systems Thinking: Sensitizing for Systems Engineering – Experiences from academic teaching and industry workshops. In: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Product Design Education*, September 6<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> 2012, Antwerp, 2012, pp. 801-806
- [GV14a] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Design Methodology for Self-optimizing Systems. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: *Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 66-69
- [GV14b] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Domain-Spanning Conceptual Design. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: *Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 69-74
- [GV14c] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Development of Self-Optimizing Systems. In: Rammig, F. J.; Schäfer, W.; Sextro, W.: *Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 25-36
- [IMP+14] IWANEK, P.; MEYER, T.; PRIESTERJAHN, C.; SEXTRO, W.; VABHOLZ, M.: Challenges. In: Rammig, F. J.; Schäfer, W.; Sextro, W.: *Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 12-15
- [KPS+14] KORF, S.; PORRMANN, M.; STAHL, K.; SUDMANN, O.; VABHOLZ, M.: Domain-Specific Design and Development. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: *Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 74-95
- [Vaß14] VABHOLZ, M.: Evaluation of the Economic Efficiency. In: Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schaefer, W.: *Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 171-180
- [VG12] VABHOLZ, M.; GAUSEMEIER, J.: Cost-Benefit-Analysis – Requirements for the Evaluation of Self-optimizing Systems. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Joint International Symposium on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering*, July 2<sup>nd</sup>-4<sup>th</sup> 2012, Hannover, 2012, pp. 14-16
- [VG14] VASSHOLZ, M.; GRAESSLER, J.: Early Analysis of the System Dynamics of Self-optimizing Systems. In: *Proceedings of the DESIGN 2014 13<sup>th</sup> International Design Conference*, May 19<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> 2014, Dubrovnik, 2014, pp. 407-416



## **Zusammenfassung**

Die deutsche Industrie nimmt im globalen Wettbewerb eine Spitzenposition ein. Grund ist die zunehmende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik, auf der über 80% der Innovationen beruhen. Sie ermöglicht einen Innovationssprung von der Mechatronik hin zu Intelligenten Technischen Systemen und vergleichsweise eine Senkung der Kosten sowie eine Steigerung des Nutzens und der Wirtschaftlichkeit. Etwa 60% der Kosten sowie der Nutzen dieser Systeme werden bereits in der Konzipierung festgelegt. In dieser Phase mangelt es den Entwicklern jedoch an einem Verständnis für die Entstehung von Kosten sowie für die Bedürfnisse der Kunden. Die Folge: Viele Innovationen scheitern am Markt, weil sie letztlich zu geringen Nutzen für den Kunden stiften oder schlicht zu teuer sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Sie umfasst ein Wirtschaftlichkeitsmodell, welches die Zusammenhänge von Kosten, Nutzen und Wirtschaftlichkeit verständlich abbildet. Die Systematik unterstützt den Entwickler bei einer kundenorientierten Erschließung von Nutzenpotentialen durch die technische Lösung innerhalb eines vorgegebenen Zielkostenrahmens. Im Fokus stehen die frühzeitige Analyse und Bewertung der Wirtschaftlichkeit Intelligenter Technischer Systeme unter Berücksichtigung ihrer besonderen Eigenschaften; dafür werden Methoden sowie eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsalternative bereitgestellt.

## **Abstract**

German industry has a leading position within global competition. The reason is the progressing development of information and communication technology which is the basis for over 80% of innovations. This progress enables intelligent technical systems with reduced costs and higher benefits and economic efficiency. 60% of the costs and benefits of a system are defined within the conceptual design. In this phase, developers' often lack the understanding of the origin of costs and the customers' needs. Thus, innovations often fail in the market, because they either do not provide enough benefit for the customer or are too costly.

The aim of this thesis is a systematic approach for the economic-efficiency-oriented conceptual design of intelligent technical systems. It includes a model of the economic efficiency, coherently representing the interconnections of costs, benefits and economic efficiency. The approach supports the development of a technical solution that exploits benefits in a customer-oriented way within predefined target costs. The early analysis and evaluation of the economic efficiency is supported by methods, taking into account the characteristics of intelligent technical systems. Furthermore, a basis for the selection of the best solution is provided.





Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung .....	5
1.1 Problematik .....	5
1.2 Zielsetzung .....	7
1.3 Vorgehensweise .....	8
2 Problemanalyse .....	11
2.1 Einordnung der Arbeit und Begriffsabgrenzung .....	11
2.1.1 Produktentstehungsprozess nach GAUSEMEIER .....	11
2.1.2 System .....	13
2.1.3 Wirtschaftlichkeit .....	15
2.1.4 Kosten .....	16
2.1.5 Nutzen .....	19
2.2 Von der Mechatronik zu Intelligenten Technischen Systemen .....	21
2.2.1 Mechatronische Systeme .....	21
2.2.2 Adaptive Systeme .....	23
2.2.3 Intelligente Technische Systeme .....	24
2.3 Selbstoptimierende Systeme .....	26
2.3.1 Aspekte eines selbstoptimierenden Systems .....	26
2.3.2 Selbstoptimierungsprozess .....	28
2.3.3 Informationsverarbeitung selbstoptimierender Systeme .....	28
2.3.4 Beispiele für selbstoptimierende Systeme .....	31
2.4 Nutzeninnovation durch Intelligente Technische Systeme .....	33
2.5 Entwicklung Intelligenter Technischer Systeme .....	35
2.5.1 Beeinflussung der Wirtschaftlichkeit in der Entwicklung .....	35
2.5.2 Lebenszykluskosten in der Entwicklung .....	37
2.5.3 Kundenorientierung in der Produktentwicklung .....	38
2.5.4 Analyse Intelligenter Technischer Systeme .....	41
2.5.5 Modelle in der Entwicklung .....	43
2.5.6 Entwicklungsmethodik für Intelligente Technische Systeme .....	45
2.6 Herausforderungen bei der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung .....	49
2.7 Anforderungen an die Systematik zur frühzeitigen Wirtschaftlichkeitsanalyse Intelligenter Technischer Systeme .....	52
2.7.1 Übergeordnete Anforderungen .....	52
2.7.2 Anforderungen an das Wirtschaftlichkeitsmodell .....	53

2.7.3	Anforderungen an die Analyse der Wirtschaftlichkeit .....	53
3	Stand der Technik.....	55
3.1	Ansätze zur Bewertung von Lösungsalternativen in der Produktentwicklung .....	55
3.1.1	Nutzwertanalyse und verwandte Ansätze .....	55
3.1.2	Technisch-wirtschaftliche Bewertung .....	58
3.2	Ansätze zur Kundenorientierung im Produktentstehungsprozess .....	59
3.2.1	Nutzenpotentiale nach PÜMPIN .....	60
3.2.2	Conjoint-Analyse .....	61
3.2.3	Ansätze zur Bewertung von Kundenzufriedenheit.....	62
3.2.4	Einfluss der Kundenzufriedenheit auf den Unternehmenswert ..	65
3.3	Ansätze zum Kostenmanagement in der Produktentwicklung .....	67
3.3.1	Target Costing.....	68
3.3.2	Wertanalyse .....	70
3.3.3	Leitfaden für ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte nach ZIRKLER.....	72
3.3.4	Verfahren für die Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien nach BRINK .....	75
3.3.5	Kostengliederungsstruktur (Cost Breakdown Structure) .....	77
3.3.6	Ansätze zur Analyse der Lebenszykluskosten .....	79
3.3.7	Ansätze zur kostenbasierten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) .....	81
3.4	Ansätze zur Analyse des Systemverhaltens Intelligenter Technischer Systeme in der Konzipierung.....	83
3.4.1	System Dynamics .....	84
3.4.2	Methode zur Zielabhängigkeitsanalyse nach DUMITRESCU .....	85
3.4.3	Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme nach POOK .....	87
3.4.4	Verfahren zur situationsspezifischen Bestimmung und Gewichtung von Entwicklungsprozesszielen nach KAHL .....	88
3.5	Handlungsbedarf.....	90
4	Die Systematik im Überblick .....	95
4.1	Wirtschaftlichkeitsmodell .....	95
4.1.1	Definition der Modellkonstrukte .....	96
4.1.2	Grundstruktur der Kosten im Lebenszyklus .....	100
4.1.3	Grundstruktur des Nutzens im Lebenszyklus .....	102
4.1.4	Richtlinien und Bedingungen der Modellierung .....	104
4.1.4.1	Vergleichbarkeit .....	104
4.1.4.2	Vollständigkeit .....	105

4.1.4.3 Richtigkeit .....	108
4.2 Vorgehensmodell .....	109
5 Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung	
Intelligenter Technischer Systeme .....	115
5.1 Identifikation von Kosten- und Nutzelementen .....	115
5.1.1 Ausgangspunkt: Entwicklungsauftrag .....	116
5.1.2 Auswahl relevanter Stakeholder .....	118
5.1.3 Identifikation von Nutzenpotentialen .....	119
5.1.4 Identifikation von Kosten- und Nutzelementen im Systemumfeld .....	122
5.1.5 Identifikation von Kosten- und Nutzelementen im Lebenszyklus .....	124
5.1.6 Identifikation von funktionsabhängigen Nutzelementen .....	127
5.2 Entwicklung des Wirtschaftlichkeitsmodells .....	129
5.2.1 Aufbau des Wirtschaftlichkeitsmodells .....	130
5.2.2 Ermittlung der Gewichtungsfaktoren für Nutzelemente .....	132
5.2.3 Kano-Kategorisierung der Nutzelemente .....	135
5.2.4 Integration von Multiplikatoren .....	137
5.2.5 Bewertung des erwarteten Nutzens .....	142
5.3 Bewertung und Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsvariante .....	143
5.3.1 Lösungsvarianten .....	144
5.3.2 Bewertung der Anforderungserfüllung .....	145
5.3.3 Durchführung der Zielkostenkontrolle .....	146
5.3.4 Prinzipiellösung .....	151
5.3.5 Bewertung der Prinzipiellösung .....	153
5.4 Bewertung der verlässlichkeitsabhängigen Elemente .....	156
5.4.1 Bewertung der verlässlichkeitsabhängigen Elemente für die bestehende Prinzipiellösung .....	156
5.4.2 Bewertung der verlässlichkeitsabhängigen Elemente für die verbesserte Prinzipiellösung .....	160
5.5 Bewertung der situationsabhängigen Elemente .....	162
5.5.1 Identifikation der relevanten Aspekte .....	163
5.5.2 Simulation des Systembetriebs .....	165
5.5.2.1 Analyse der Ist-Situation .....	165
5.5.2.2 Bestimmung der Systemziele .....	167
5.5.2.3 Anpassung des Systemverhaltens .....	168
5.5.3 Bewertung der situationsabhängigen Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell .....	171
5.6 Bewertung der Wirtschaftlichkeit .....	173
5.6.1 Prüfung der Plausibilität des Wirtschaftlichkeitsmodells .....	173

5.6.2 Überprüfung der Wirtschaftlichkeit .....	174
5.6.3 Ermittlung der Zielkosten für die weitere Entwicklung .....	175
5.7 Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen.....	177
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	181
7 Abkürzungsverzeichnis.....	185
8 Literaturverzeichnis.....	189

## **Anhang**

A1 Kategorisierung Intelligenter Technischer Systeme.....	A-1
A2 Anlagen zur Entwicklungsaufgabe.....	A-5
A2.1 Trendanalyse .....	A-5
A2.2 Stakeholderanalyse .....	A-6
A2.3 Kundenbedürfnisse und -anforderungen .....	A-8
A3 Analyse der Verlässlichkeit.....	A-11
A4 Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells .....	A-14
A5 Plausibles Wirtschaftlichkeitsmodell für das RailCab .....	A-17

# 1 Einleitung

*Ein Zyniker ist ein Mensch, der von allem den Preis und von nichts den Wert kennt<sup>1</sup>.*

– OSCAR WILDE

Die vorliegende Arbeit adressiert eine wirtschaftlichkeitsorientierte Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme im Rahmen der Produktentstehung. Die entwickelte Systematik zeigt auf, wie prinzipielle Lösungen für diese Systeme entwickelt werden können, welche das hohe wirtschaftliche Potential Intelligenter Technischer Systeme ausschöpfen und so Nutzen für die Stakeholder stiften.

Die Problematik und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird in den Abschnitten<sup>2</sup> 1.1 und 1.2 dargestellt. In Abschnitt 1.3 wird ein Überblick über den Aufbau der Arbeit gegeben.

## 1.1 Problematik

In Zeiten der Eurokrise und einer verharrenden Weltkonjunktur gilt mehr als je zuvor: Innovationen stärken die internationale Wettbewerbsfähigkeit. Die deutsche Industrie konnte als drittinnovativste weltweit im Jahr 2013 ihren Abstand zur Spitze weiter verringern [BD13, S. 2ff.]. Einen wesentlichen Beitrag hierzu hat die zunehmende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik geliefert, auf der über 80 Prozent der Innovationen in Deutschland beruhen [Sie12, S. 15]. Neben dieser Entwicklung stellen auch nicht-technische Disziplinen, wie die Kognitionswissenschaft oder Neurobiologie, vielfältige Möglichkeiten bereit, mit denen sich die Funktionalität technischer Systeme weiter steigern lässt [GTD13, S. 49]. Der Innovationssprung von der Mechatronik hin zu Intelligenen Technischen Systemen ermöglicht neue Perspektiven, welche durch Schlüsselwörter wie „Things that Think“, „Cyber-Physical Systems“ und „Industrie 4.0“ beschrieben werden [DAG13, S. 112]. Intelligente Technische Systeme sind wesentlicher Innovationstreiber für die Export- und Wachstumsmärkte der deutschen Industrie [aca11, S. 5].

---

<sup>1</sup> Vgl. Lady Windermere's Fächer, 3. Akt/Lord Darlington, (Original engl.: "[A cynic is] a man who knows the price of everything and the value of nothing.").

<sup>2</sup> Angelehnt an die DIN-Norm 1421 wird die vorliegende Arbeit in Abschnitte und nicht in Unterkapitel oder Unterabschnitte untergliedert [DIN1421, S. 1].

Als Wegbereiter für diese Entwicklung gilt der BMBF<sup>3</sup>-Spitzencluster Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe (it's OWL), dessen Ziel die Einführung Intelligenter Technischer Systeme in der industriellen Anwendung ist [GDJ+14, S. 336ff.], [GTD13, S. 50]. Intelligente Technische Systeme lassen sich heute bereits durch den Einsatz von Selbstoptimierung in mechatronischen Systemen ermöglichen. Das Technologiekonzept des Spitzenclusters baut daher auf den Arbeiten des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende System des Maschinenbaus“ auf [GRS14].

Intelligente Technische Systeme sind in der Lage, intelligent und flexibel auf veränderte Umgebungsbedingungen zu reagieren. Ihr Verhalten geht somit weit über die reaktiven und starren Verhaltensweisen konventioneller mechatronischer Systeme hinaus [Dum11, S. 19]. Diese Systeme werden durch vier Eigenschaften charakterisiert. Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich [Dum11, S. 19], [GTD13, S. 49]. Durch diese Eigenschaften werden prinzipielle Lösungen ermöglicht, welche das Kosten/Nutzen-Verhältnis und somit die Wirtschaftlichkeit bestehender Systeme erheblich verbessern können [Ben05, S. 5]. Das Resultat: Die Differenzierung über den Nutzen bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten über den Lebenszyklus wird ermöglicht – eine sogenannte Nutzeninnovation [KM05, S. 12ff.].

Immer wieder scheitern jedoch Innovationen am Markt, weil sie letztlich zu geringen oder keinen Nutzen für die Stakeholder stiften [Sch12, S. 1]. Nutzen beschreibt die Fähigkeit eines Produkts ein bestimmtes Kundenbedürfnis zu befriedigen [Spr14a-ol]. Zur Abschätzung des Geschäftserfolgs ist daher eine starke Fokussierung heutiger und zukünftiger Kundenbedürfnisse über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg erforderlich [Nie09, S. 229], [GEK01, S. 75]. Im Rahmen des Produktentstehungsprozesses werden diese Bedürfnisse in der strategischen Produktplanung ermittelt und in der Konzipierung durch eine prinzipielle Lösung erschlossen [GP14, S. 25]. Für Intelligente Technische Systeme erfolgt die Konzipierung interdisziplinär, da an ihrer Entwicklung neben den Fachdisziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik auch Experten aus den Bereichen der höheren Mathematik und der künstlichen Intelligenz beteiligt sind [DGI+14, S. 4f.]. Die Konzipierung bildet die Schnittstelle zwischen der strategischen Produktplanung und der fachdisziplinspezifischen Produktentwicklung [GP14, S. 25].

Im Rahmen der Konzipierung werden mittels der Prinzipiellösung nicht nur die technischen Eigenschaften des Systems festgelegt, sondern auch bereits bis zu 60 Prozent seiner Kosten [Kol98, S. 62], [Bue09, S. 8]. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Kostendrucks ist eine frühzeitige Abschätzung der Kosten, welche das zu entwickelnde System über den Lebenszyklus verursacht, unabdingbar [Bue09, S. 8]. Insbesondere bei komplexen Systemen, wie Intelligenzen Technischen Systemen, können die Entwickler leicht den

---

<sup>3</sup> Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Überblick über die zukünftig entstehenden Kosten verlieren [Ahm95, S. 261]. Laut einer Umfrage ist für 50 Prozent der befragten Entwickler das Verständnis für die Entstehung der Kosten ihres Produkts nur schwer bzw. überhaupt nicht gegeben [BHL07, S. 41]. Dieses Verständnis ist jedoch notwendig, um kosteneffiziente Lösungen zu finden. Es gilt somit, bereits im Rahmen der Konzipierung ein gemeinsames Verständnis der Entwickler für die Kostenentstehung über den Lebenszyklus zu schaffen [SPJ+02, S. 543]. Auch die Eigenschaften des Intelligenten Technischen Systems sowie der daraus resultierende Nutzen, werden in allen Lebenszyklusphasen durch konstruktive Einflüsse geprägt und in der Prinziplösung festgelegt [Nie09, S. 255]. Die Entwickler benötigen also zudem ein Verständnis für den Kunden und dessen Bedürfnisse, um kundenorientierte Verbesserungen am Konzept vornehmen zu können [DNL96, S. 103]. Hierbei sind die besonderen Charakteristika Intelligenter Technischer Systeme zu berücksichtigen, welche u.a. eine hohe Systemdynamik sowie ggf. eine gesteigerte Verlässlichkeit des Systems ermöglichen. Ein einheitliches Verständnis für das System wird durch modellbasierte Ansätze realisiert, welche zudem die Analyse komplexer Systeme ermöglichen [HFW+12, S. 41], [GFD+09, S. 201ff.].

## **Fazit**

Der Einsatz von Intelligenten Technischen Systemen in der industriellen Anwendung stellt ein hohes Nutzenpotential für den Innovationsstandort Deutschland dar. Dieses Potential ist jedoch noch kein Garant dafür, dass das System am Markt erfolgreich sein wird. Ein Markterfolg ist nur dann gegeben, wenn die technische Lösung die Bedürfnisse der Kunden entsprechend in einem vorgegebenen Kostenrahmen befriedigt. Die Weichen werden hierfür bereits im Rahmen der Konzipierung durch die Prinziplösung gestellt. Es bedarf daher einer durchgängigen Systematik, welche eine wirtschaftlichkeitsorientierte Konzipierung dieser Systeme ermöglicht. Mittels eines Wirtschaftlichkeitsmodells ist zudem ein einheitliches Verständnis für die Entstehung von Kosten und Nutzen über ihren Lebenszyklus zu schaffen.

## **1.2 Zielsetzung**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme im Rahmen der Produktentstehung. Sie richtet sich gleichermaßen an Produktentwickler sowie an Entscheider. Es gilt, das interdisziplinäre Entwicklungsteam bei der Entwicklung und Auswahl von Lösungsalternativen nach dem Ziel der Wirtschaftlichkeit zu unterstützen. Als integraler Bestandteil der Konzipierung soll die Systematik die kundenorientierte Erschließung von Nutzenpotentialen durch die technische Lösung innerhalb eines vorgegebenen Zielkostenrahmens ermöglichen. Hierzu erfolgt eine Ergänzung der Prinziplösung um den Aspekt der Wirtschaftlichkeit. Das Wirtschaftlichkeitsmodell bildet die Zusammenhänge von Kosten, Nutzen und Wirtschaftlichkeit vor dem Hintergrund der Prinziplösung ab und schafft somit ein einheitliches Verständnis für ihre Entstehung über den Lebenszyklus des Systems.

Die Systematik stellt zudem Methoden<sup>4</sup> bereit, welche eine frühzeitige Analyse und Bewertung der Wirtschaftlichkeit Intelligenter Technischer Systeme unter Berücksichtigung ihrer besonderen Eigenschaften ermöglichen. Die Systematik liefert somit eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsalternative und einen Rahmen für die nachfolgende wirtschaftliche, disziplinspezifische Entwicklung.

### 1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. In **Kapitel 2** erfolgt eine Präzisierung der in Abschnitt 1.1 dargelegten Problematik. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Einordnung der Arbeit in den Produktentstehungsprozess sowie die Definition und Abgrenzung relevanter Begriffe. Im Anschluss wird der Innovationssprung von mechatronischen hin zu Intelligenten Technischen Systemen aufgezeigt. Das Technologiekonzept selbstoptimierender Systeme wird exemplarisch für diese Systeme vorgestellt und ihre Nutzenpotentiale dargelegt. Es schließt eine Diskussion insbesondere der frühen Phase der Entwicklung dieser Systeme vor dem Hintergrund von Kosten, Nutzen und Wirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus an. Die Problemanalyse ermöglicht die Konsolidierung der Herausforderungen bei der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme und die Ableitung von Anforderungen an die Systematik.

In **Kapitel 3** wird der Stand der Technik vor dem Hintergrund der Anforderungen an die Systematik diskutiert. Zunächst werden allgemeine Bewertungsmethoden vorgestellt, welche bei der Auswahl Erfolg versprechender Lösungsalternativen im Rahmen der Konzipierung unterstützen. Um den Markterfolg eines Systems sicherzustellen, ist eine kontinuierliche Kundenorientierung im Produktentstehungsprozess sowie das Management der Kosten im Rahmen der Produktentwicklung notwendig. Entsprechende Ansätze aus dem Stand der Technik werden in diesem Kapitel ebenfalls diskutiert. Intelligente Technische Systeme entfalten ihr Potential erst im Rahmen des Systembetriebs auf Grundlage ihres Verhaltens. Um eine umfassende Analyse und Bewertung der Systeme sicherzustellen, ist daher das Systemverhalten bereits in der frühen Entwicklungsphase zu berücksichtigen. Ansätze wie „System Dynamics“ können dieser Anforderung gerecht werden. Die abschließende Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der Anforderungen ermöglicht die Ableitung des Handlungsbedarfs.

---

<sup>4</sup> Eine Methode bezeichnet eine *Menge von Vorschriften, deren Ausführung den Vollzug einer als zweckmäßig erachteten Operationsfolge unter gegebenen Bedingungen hinreichend sicherstellt* [Mat65, S. 13], [Mül90, S. 17]. Methoden sind somit präskriptiv und zielorientiert, also mit Fokus auf die Lösung eines Problems oder eine Aufgabenstellung [Lin05, S. 48].



**Kapitel 4** gibt einen Überblick über die Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Kern der Systematik ist das Wirtschaftlichkeitsmodell, welches den Aspekt Wirtschaftlichkeit mittels definierter Elemente und Beziehungen abbildet. Zur Unterstützung des interdisziplinären Entwicklungsteams wird eine Grundstruktur der Kosten und des Nutzens über den Lebenszyklus Intelligenter Technischer Systeme bereitgestellt. Diese dient als Schablone und ist lösungsspezifisch auszuprägen. Um die Plausibilität des Wirtschaftlichkeitsmodells sicherzustellen, werden Vorgaben in Form von Richtlinien und Bedingungen abgebildet. Zur Entwicklung und Bewertung des Wirtschaftlichkeitsmodells im Rahmen der Konzipierung stellt die Systematik Methoden und Vorgehensweisen bereit, welche zu einem systematischen Vorgehen zusammengefasst sind.

Die einzelnen Phasen der Systematik werden in **Kapitel 5** an einem Validierungsbeispiel vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung der Systematik hinsichtlich der Anforderungen aus Kapitel 2.

**Kapitel 6** fasst die vorliegende Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf.



## 2 Problemanalyse

Im Rahmen der Problemanalyse werden Anforderungen an eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme abgeleitet. Basierend auf der Problematik in Abschnitt 1.1 erfolgt eine Einordnung der vorliegenden Arbeit sowie die Definition relevanter Begriffe in Abschnitt 2.1. Die technologische Entwicklung von mechatronischen hin zu Intelligenen Technischen Systemen wird in Abschnitt 2.2 aufgezeigt. Exemplarisch für Intelligente Technische Systeme werden selbstoptimierende Systeme in Abschnitt 2.3 detailliert betrachtet. Intelligente Technische System weisen ein hohes Nutzen- sowie Kosteneinsparungspotential auf und können somit als Grundlage für eine Nutzeninnovation dienen (vgl. Abschnitt 2.4). Im Rahmen der Entwicklung dieser Systeme gilt es, diese Potentiale entsprechend unter dem Ziel der Wirtschaftlichkeit durch die technische Lösung auszuschöpfen (vgl. Abschnitt 2.5). Die daraus resultierenden Herausforderungen werden in Abschnitt 2.6 zusammengefasst. Abschließend werden auf ihrer Basis Anforderungen an die Systematik in Abschnitt 2.7 abgeleitet.

### 2.1 Einordnung der Arbeit und Begriffsabgrenzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme im Rahmen der Produktentstehung. Vor diesem Hintergrund wird die Systematik in Abschnitt 2.1.1 in den Produktentstehungsprozess nach GAUSEMEIER eingeordnet [GP14, S. 26]. In den Abschnitten 2.1.2 bis 2.1.5 werden zentrale Begriffe der Arbeit diskutiert und definiert. Hierbei wird kein Anspruch auf eine vollständige Diskussion der Literatur erhoben. Die Begriffsdefinition dient vielmehr dem einheitlichen Verständnis.

#### 2.1.1 Produktentstehungsprozess nach GAUSEMEIER

Der Produktentstehungsprozess reicht von der Geschäftsidee bis hin zum erfolgreichen Serienanlauf. Er wird in drei Aufgabenbereiche gegliedert: strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung (vgl. Bild 2-1). Diese Aufgabenbereiche und ihre implizierten Tätigkeiten bedingen sich und sind zyklisch, nicht sequenziell, zu bearbeiten.

Die **strategische Produktplanung** beschreibt das Vorgehen vom Finden zukünftiger Erfolgspotentiale zum Erfolg versprechenden Produktkonzept. Im Rahmen der Potentialfindung werden mit Methoden, wie der Trendanalyse, heutige und zukünftige Kundenbedürfnisse antizipiert und zukünftige Erfolgspotentiale abgeleitet [GEK01, S. 75], [GP14, S. 25]. Diese werden im Rahmen der Produktfindung durch geeignete Produktideen erschlossen. Die Geschäftsstrategie für ausgewählte Produktideen bildet den Ausgangspunkt für die Geschäftsplanung.

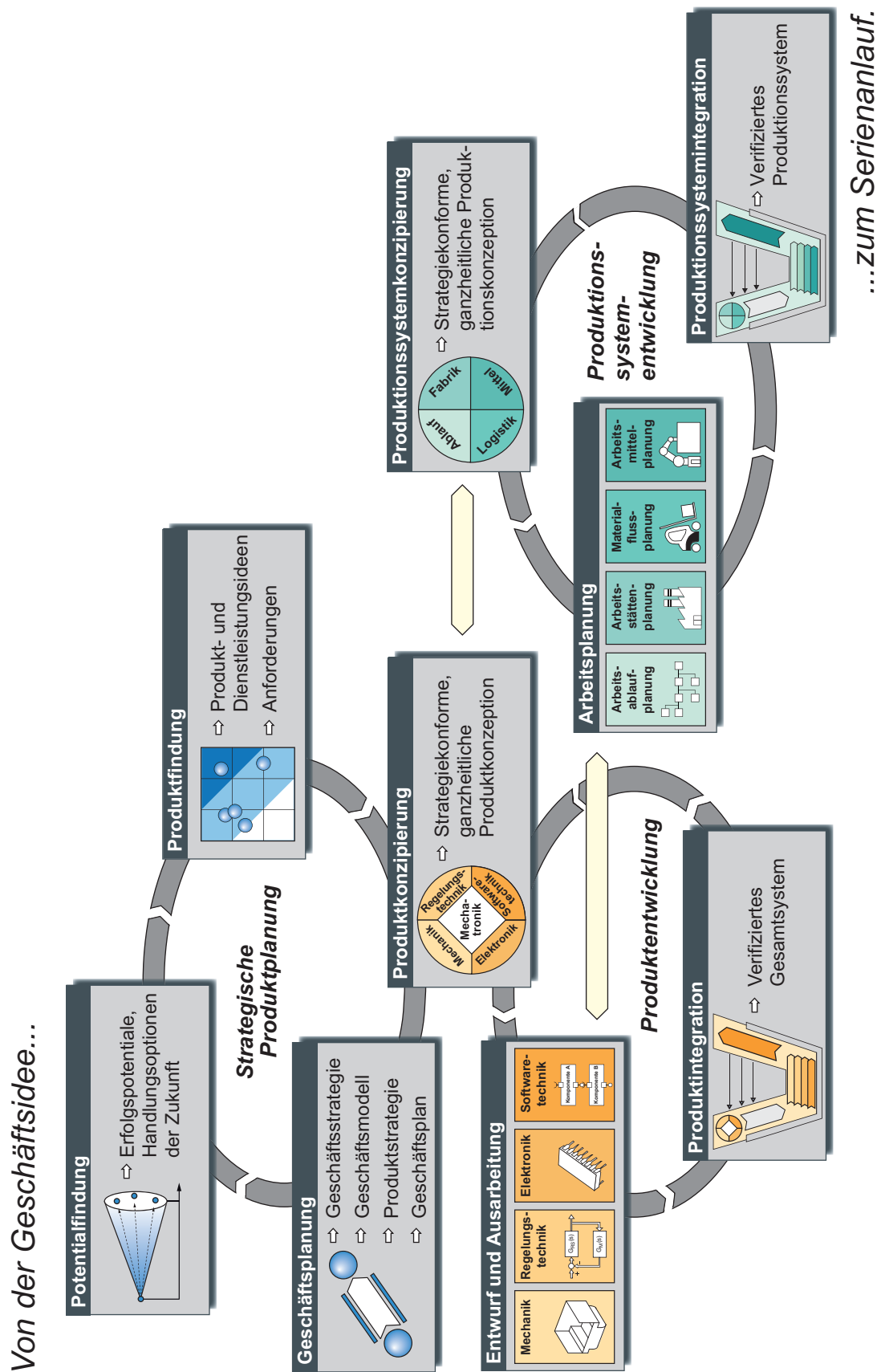


Bild 2-1: 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER [GDS+13, S. 43]

Die Geschäftsplanung legt fest, wann welche Marktsegmente wie bearbeitet werden sollen. Die Ergebnisse werden in der Produktstrategie konkretisiert und fließen in den Geschäftsplan ein. Ziel ist der Nachweis, ob ein attraktiver Return on Investment (RoI) zu erzielen ist [GP14, S. 25]. Der Geschäftsplan liefert somit den Rahmen für die weitere wirtschaftliche Produktentwicklung. Die hierfür notwendigen Ergebnisse der strategischen Produktplanung werden im Entwicklungsauftrag zusammengefasst [WDG14, S. 124ff.].

Die **Produktkonzipierung** bildet die Schnittstelle zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung [GP14, S. 25]. Nach PAHL/BEITZ wird unter *konzipieren* die Phase verstanden, die nach Planen und Klären der Problemstellung durchgeführt wird. Mittels Abstraktion der Problemstellung, dem Aufstellen einer Funktionshierarchie, der Suche nach geeigneten Wirkprinzipien sowie deren Kombination in der Wirkstruktur wird die prinzipielle Lösung, auch Prinziplösung genannt, festgelegt [PBF+07, S. 171], [GEK01, S. 216]. Die Konzipierung ist der Ausgangspunkt für den disziplinspezifischen Entwurf, dessen Ausarbeitung und die Integration der Ergebnisse zu einer verifizierten Gesamtlösung im Rahmen der **Produktentwicklung**. Das Virtual Prototyping beschreibt die Bildung und Analyse von rechnerinternen Modellen und unterstützt den Entwicklungsprozess [GP14, S. 26].

Die **Produktionssystementwicklung** erfolgt wechselseitig mit der Produktentwicklung. Den Ausgangspunkt dieses Zyklus bildet die Produktionssystemkonzipierung. Sie wird durch die Tätigkeiten Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Arbeitsmittelplanung, Produktionslogistik sowie Materialflussplanung determiniert [GP14, S. 26].

Eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme ist der Schnittstelle zwischen strategischer Produktplanung und Produktentwicklung zuzuordnen. Die Produktkonzipierung wird auch als frühe Phase der Entwicklung bezeichnet. Mit der Prinziplösung werden die wesentlichen Weichen für die weitere Entwicklung eines technischen Systems gestellt. Ungünstige Entscheidungen lassen sich in den nachfolgenden Entwicklungsschritten nicht oder nur mit großem Aufwand korrigieren [Kol98, S. 62]. Es gilt somit, ein Produktkonzept zu entwickeln, welches die Bedürfnisse der Kunden befriedigt, die Zielkosten einhält und somit wirtschaftlich ist.

### 2.1.2 System

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Allgemein können Systeme<sup>5</sup> sowohl natürlich (bspw. der Organismus oder das

---

<sup>5</sup> Der Begriff System ist vom spätlateinischen Wort *systema* abgeleitet, was so viel bedeutet wie *aus mehreren Teilen zusammengesetztes und gegliedertes Ganzes* [Dud14-ol].

Ökosystem) oder künstlich vom Menschen erschaffen sein (politische Systeme, ökonomische Systeme, technische Systeme etc.) [BF11, S. 2]. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Definitionen für den Systembegriff bspw. nach BERTALANFFY [Ber72, S. 18], FORRESTER [For72, S. 1], ULRICH und PROBST [UP91, S. 30] oder der INCOSE<sup>6</sup> [KSW13, S. 350]. Die vorliegende Arbeit folgt der Definition der DIN-Norm 60050. Ein **(technisches) System** ist demnach eine Menge von miteinander in Beziehung stehenden Elementen, welche in einem definierten Zusammenhang als Ganzes gesehen werden und in diesem Kontext von ihrer Umgebung abgegrenzt sind [DIN60050, S. 11].

Systeme bestehen aus Elementen sowie deren Eigenschaften und Funktionalitäten. Diese Elemente können wiederum selbst Systeme, sogenannte *Subsysteme*, sein. Sie sind untereinander durch *Beziehungen* verbunden (bspw. Materialfluss-, Informationsfluss-, Lagebeziehungen oder Wirkzusammenhänge). Systemelemente und deren Beziehungen bilden ein Gefüge und weisen somit eine Ordnung auf, die sogenannte *Systemstruktur*. Zudem sind Systeme von ihrem Umfeld und anderen Systemen durch eine definierte *Systemgrenze* abgegrenzt [HFW+12, S. 34f.].

Systeme lassen sich in verschiedene Kategorien einordnen; ein System kann dabei mehreren Kategorien angehören. Es wird neben natürlichen und künstlichen Systemen auch zwischen geschlossenen und offenen sowie statischen und dynamischen Systemen unterschieden [Kol98, S. 24ff.], [Has72a, S. 37], [Ber71, S. 38ff.], [BF11, S. 5ff.]. **Geschlossene Systeme** bilden ein weitgehend unabhängiges System, ohne bzw. mit minimalen Wechselwirkungen zu ihrer Umgebung [Has72a, S. 37], [BF11, S. 8]. **Offene Systeme** sind über Stoff-, Informations- und Energieflüsse über die Systemgrenze hinaus mit der Umwelt verbunden und interagieren mit dieser [Ber72, S. 22], [BF11, S. 8], [Has72b, S. 57f.]. **Statische Systeme** weisen eine über den Zeitverlauf konstante Struktur auf und ihre Systemelemente und Verbindungen zeigen keine Aktivität auf [BF11, S. 7]. **Dynamische Systeme** zeichnen sich hingegen durch dynamische Wirkbeziehungen der Systemelemente aus. Durch das Zusammenspiel der Elemente übertreffen die Eigenschaften des dynamischen Systems die Fähigkeiten der einzelnen Systemelemente [Has72a, S. 32].

Durch Koppelung eigenständiger Systeme bspw. durch einen Informationsfluss entstehen sogenannte **Systems of Systems**. Entscheidend ist hierbei, dass die individuellen Systeme nicht ausschließlich vom übergeordneten System abhängig sind. Sie können unabhängig davon allein oder mit anderen Systemen betrieben werden und erfüllen einen eigenen Nutzen bzw. Zweck [Mai98, S. 268], [HFW+12, S. 37]. Durch das Zusammenwirken der Systeme wird ein zusätzlicher bzw. größerer Nutzen realisiert als dies ein einzelnes System ermöglichen könnte [HFW+12, S. 37].

---

<sup>6</sup> International Council on Systems Engineering (INCOSE).

### 2.1.3 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit eines Systems wird maßgeblich durch den Entwickler beeinflusst. Sie ist daher bereits frühzeitig in der Produktentwicklung zu berücksichtigen [VDI2235, S. 3]. Wirtschaften heißt wählen [Sch25, S. 12]. Einem wirtschaftlich arbeitenden Unternehmen gelingt es, eine bestimmte Leistung mit einem möglichst geringen Mitteleinsatz oder mit einem gegebenen Mitteleinsatz die bestmögliche Leistung zu erbringen. Dieses Prinzip der Wirtschaftlichkeit, auch das ökonomische Prinzip<sup>7</sup> genannt, ist somit ein Auswahlprinzip für die geeignetste Lösungsalternative [Gut58, S. 31]. Zur Untermauerung des unternehmerischen Handelns auf Basis des ökonomischen Prinzips wird die Wirtschaftlichkeitsrechnung<sup>8</sup> eingesetzt [Sch86, S. 17]. Diese besteht aus zwei Teiloperationen. Zuerst werden die Lösungsvarianten fixiert. Im zweiten Schritt ist für diese das Optimum zu bestimmen und die wirtschaftlichste Lösung auszuwählen [Koc70, S. 13].

**Wirtschaftlichkeit** bezeichnet den Quotienten von wertmäßigem Output zu wertmäßigem Input einer Unternehmung [Gut58, S. 31f.], [Wöh13, S. 38]. Es handelt sich um eine dimensionslose Zahl. Beträgt sie genau eins, wird weder Verlust noch Gewinn erzielt [Tho08, S. 111]. In der Literatur wird zwischen der absoluten und der relativen Wirtschaftlichkeit sowie Produktivität und Rentabilität unterschieden. Übersteigen die Erträge (Erlöse) die Aufwendungen (Kosten) wird von *absoluter Wirtschaftlichkeit* gesprochen. Eine privatwirtschaftliche Unternehmung ist nur dann rentabel und überlebensfähig, wenn sie über einen längeren Zeitraum absolut wirtschaftlich arbeitet [Bro64, S. 9], [WBH+96, S. 14], [VDI2234, S. 28]. *Relative Wirtschaftlichkeit* beschreibt das Verhältnis von Ertrag zu Kosten verschiedener Lösungsalternativen. Eine Lösungsalternative ist relativ wirtschaftlicher, wenn sie bei gleichen Erlösen weniger Kosten verursacht [Bro64, S. 10], [WBH+96, S. 14], [VDI2234, S. 29]. *Produktivität* (bzw. technische Wirtschaftlichkeit) bezeichnet den Quotienten aus Ergebnis und Mitteleinsatz [Boh93, S. 2186], [Gut58, S. 29]. Ist das Ergebnis eine Gewinnziffer (z.B. Betriebsergebnis) und der Nenner eine Wertziffer, dann wird der Quotient als *Rentabilität* bezeichnet [Boh93, S. 2186], [Gut58, S. 32].

Die Konzipierung von Intelligenten Technischen Systemen nach dem Prinzip der Wirtschaftlichkeit wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als *wirtschaftlichkeitsorientierte Konzipierung* bezeichnet. In dieser frühen Phase ist jedoch eine quantitative Bewertung von Lösungsalternativen wie oben beschrieben auf Grund von mangelnden Informationen

---

<sup>7</sup> Das ökonomische Prinzip wird durch drei Prinzipien ausgedrückt. Erstens ist mit einem gegebenen Aufwand an Wirtschaftsgütern ein möglichst hoher Ertrag zu erzielen (Maximusprinzip). Zweitens ist ein angestrebter Ertrag mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen (Minimumsprinzip). Drittens ist ein möglichst optimales Verhältnis von Aufwand und Ertrag zu realisieren (Extremumsprinzip) [SW08, S. 5].

<sup>8</sup> Häufig wird der Begriff der Wirtschaftlichkeitsrechnung synonym für Investitionsrechnung verwendet [Gut58, S. 72]. Eine Investition bezeichnet die Überführung von Zahlungsmitteln in Sachvermögen oder Finanzvermögen. Eine Investition wird somit durch eine Auszahlungs- und eine Einzahlungsoperation charakterisiert [WBH+96, S. 15], [Sch68, S. 4].

oftmals schwer möglich [Sch86, S. 18], [VDI2234, S. 30]. Für die Entscheidungsfindung werden daher neben den quantitativen Kriterien auch qualitative bzw. nicht monetär bewertbare Kriterien (bspw. Ästhetik) herangezogen [WBH+96, S. 13], [VDI2234, S. 28]. Die Berechnung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt im Rahmen der Arbeit wie in Gleichung 2-1 dargestellt.

$$\text{Wirtschaftlichkeit } w = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Kosten}} \quad \begin{array}{l} \text{mit } w < 1 \text{ nicht wirtschaftlich} \\ \text{mit } w \geq 1 \text{ wirtschaftlich} \end{array}$$

*Gleichung 2-1: Bewertung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Arbeit in Anlehnung an [Tho08, S. 111]*

### 2.1.4 Kosten

Die vorliegende Arbeit folgt der Definition der Kosten nach der VDI-Richtlinie 2234. Unter Kosten<sup>9</sup> in der Produktentstehung werden der in Geld bewertete Verbrauch von Gütern (bspw. Materialverbrauch, Abschreibungen) sowie Dienstleistungen (z.B. Löhne, Sozialkosten) verstanden, der für die Umsetzung sowie Aufrechterhaltung der betrieblichen Leistungserstellungsprozesse benötigt wird. Kosten sind dadurch gekennzeichnet, dass Güter oder Dienstleistungen verbraucht werden, die unmittelbar mit den betrieblichen Leistungserstellungsprozessen in Zusammenhang stehen und darüber hinaus monetär bewertbar und somit vergleichbar und verrechenbar sind [VDI2234, S. 9]. Kosten lassen sich nach verschiedenen Merkmalen kategorisieren, für die zahlreiche Methoden zur Kostenermittlung in der Literatur existieren (vgl. z.B. [VDI2234], [CFG12], [Kos79]) [EKL07, S. 412]. Es kann eine Unterscheidung nach *Kostenarten* (z.B. Material, Personal), nach *Kostenstellen* (z.B. betrieblichen Funktionen), nach *Kostenträgern* (z.B. Produkt, Komponente), nach *Zurechenbarkeit* (Einzel- und Gemeinkosten) sowie nach *Abhängigkeit vom Beschäftigungsgrad* (fixe und variable Kosten) erfolgen [EKL07, S. 412], [VDI2234, S. 10], [CFG12, S. 72ff. u. S. 118f.], [VDI2234, S. 10].

---

<sup>9</sup> Allgemein betrachtet sind Kosten immer das Produkt aus Faktoreinsatzmenge und dem entsprechenden Preis [Gut58, S. 65]. In der Betriebswirtschaftslehre sind drei Interpretationen des Kostenbegriffs hervorzuheben; die *wertmäßige*, die *pagatorische* und die *entscheidungsorientierte* Kosteninterpretation [CFG12, S. 24]. Nach SCHMALENBACH und KOSIOL definiert der wertmäßige Kostenbegriff Kosten als bewertete(r) sachzielbezogene(r) Gütererstellung bzw. -verbrauch [Sch25, S. 9], [Kos69, S. 21]. KOCH definiert im Sinne der pagatorischen Sicht nur zahlungswirksame, leistungsorientierte Güterverbräuche als Kosten, hierzu zählen keine Abschreibungen [Koc58, S. 355ff.]. Kosten im entscheidungsorientierten Kostenbegriff sind *die mit der Entscheidung über das betrachtete Objekt ausgelösten Ausgaben* [Rie90, S. 81], [CFG12, S. 24]. Für eine detaillierte Diskussion des Kostenbegriffs sei auf [Men65] verwiesen.



Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diejenigen Kosten betrachtet, die durch das zu entwickelnde System über seinen Produktlebenszyklus<sup>10</sup> verursacht werden. Diese werden in Bild 2-2 dargestellt und im Folgenden erläutert.

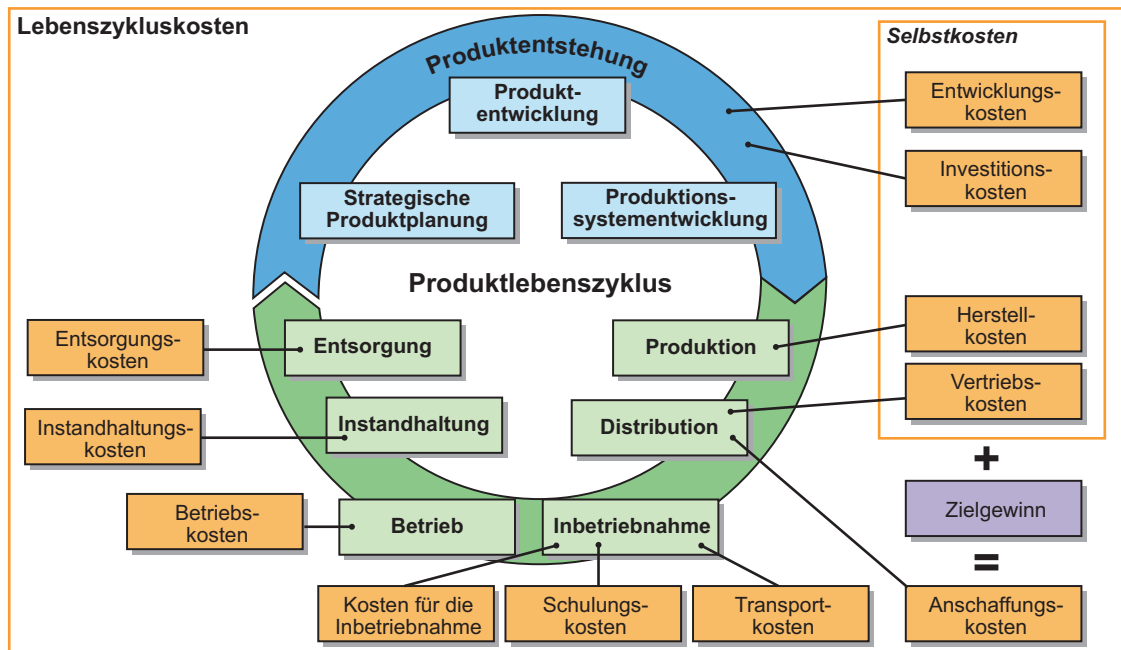


Bild 2-2: Entstehung von Kosten im Produktlebenszyklus (in Anlehnung an [GLR+00, S. 3])

Als **Entwicklungskosten** werden die Kosten bezeichnet, welche während der Entwicklung des Systems entstehen. Den Hauptteil der Entwicklungskosten bilden bei einer hohen Eigenentwicklungstiefe die Personalkosten [EKL07, S. 144]. Die **Herstellkosten**<sup>11</sup> bilden den Kern der produktbezogenen Kosten. Sie sind die Summe aus Material- und Fertigungskosten<sup>12</sup> [VDI2235, S. 9], [FGK+13, S. 130], [CFG12, S. 143].

<sup>10</sup> Der (intrinsische) Produktlebenszyklus beginnt mit der strategischen Produktplanung und endet mit der Außerbetriebnahme und Entsorgung des Produkts [Lin09, S. 334], [FGG+13, S. 297].

<sup>11</sup> Der Begriff *Herstellkosten* wird im Rahmen der Kostenrechnung eingesetzt. Das Steuer- und Handelsrecht spricht hingegen von *Herstellungskosten* (bspw. § 6 Abs. 1 EStG [Bec06, S. 41]; § 255 Abs. 2 HGB [Bec09, S. 256]) [CFG12, S. 137].

<sup>12</sup> Materialkosten unterteilen sich in Materialeinzel- und Materialgemeinkosten [Kos69, S. 121], [VDI2235, S. 13]. *Fertigungskosten* setzen sich aus Lohn-, Gemein- sowie Sondereinzelkosten der Fertigung zusammen [Kos69, S. 121f.], [VDI2235, S. 9]. Die Fertigungskosten sind bspw. von der gefertigten Losgröße sowie den Rüstzeiten abhängig [EKL07, S. 175].

Die Höhe der Herstellkosten eines Produkts wird insbesondere durch die Aufgabenstellung, die prinzipielle Lösung, Kompliziertheit<sup>13</sup> des Systems, dessen Baugröße, die eingesetzten Werkstoffe sowie die Stückzahl bzw. Losgröße beeinflusst [VDI2235, S. 11], [EKL07, S. 162]. Darüber hinaus gibt es produktbezogene Kosten, die nicht direkt einer Produktionseinheit zugerechnet werden können [EKL07, S. 5]. Kosten entstehen zudem durch Verwaltung und Vertrieb, die ebenfalls auf das Produkt umzulegen sind. Die **Selbstkosten** eines Produkts ergeben sich aus der Summe der Herstell-, Entwicklungs-, Investitions-, Vertriebskosten sowie sonstigen Kosten [EKL07, S. 141]. Die Selbstkosten umfassen somit alle Kosten, die einem Unternehmen im Produktentstehungsprozess entstehen.

Auf Basis der Selbstkosten, zuzüglich eines Zielgewinns aus Unternehmenssicht<sup>14</sup>, kann ein kalkulierter Brutto-Verkaufspreis ermittelt werden. Diese Vorgehensweise entspricht einem Verkäufermarkt; ob der Kunde<sup>15</sup> diesen Preis akzeptiert, ist jedoch nicht sichergestellt. Ein vom Kunden akzeptierter **Produktpreis** hat dessen Vorstellungen vom Nutzen des Produkts zu erfüllen und ist stark von den am Markt üblichen Preisen abhängig [FGK+13, S. 143], [EKL07, S. 413]. Im Rahmen des Target Costing, auch Zielkostenmanagement genannt, kann der vom Markt akzeptierte Preis ermittelt werden. Durch Abzug eines Zielgewinns lassen sich so vor der Entwicklung die zulässigen Selbstkosten für das Produkt ermitteln [FGK+13, S. 143].

Der Produktpreis stellt in Form von **Anschaffungskosten**<sup>16</sup> die initialen Kosten für den Kunden dar. Über die weitere Nutzungsdauer des Produkts entstehen dem Kunden weitere Kosten [SS95, S. 80]. Die Kosten, die dem Kunden entstehen, werden als Gesamtkosten [VDI2235, S. 7ff.], Lebenslaufkosten [EKL07, S. 123] oder Lebenszykluskosten (*Life-Cycle Costs*) [Bla78, S. 9f.], [VDI2800, S. 6], [VDI2884, S. 5] bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird im Folgenden der Begriff Lebenszykluskosten verwendet. **Lebenszykluskosten** umfassen *einmalige Kosten*, *Betriebskosten* und *Instandhaltungskosten* [VDI2235, S. 8]. Zu den **einmaligen Kosten** zählen neben den Anschaffungskosten, Kosten für den Transport und die Aufstellung, für Inbetriebnahme und Anlernen sowie für Umweltschutz und Entsorgung. **Betriebskosten** bilden die Summe aus den Kosten

---

<sup>13</sup> Die Kompliziertheit eines Produkts ist abhängig von der Art seiner Zusammensetzung, d.h. von der Anzahl der Systemelemente und ihrer Verschiedenheit sowie ihren Beziehungen untereinander [UP91, S. 61].

<sup>14</sup> Im Rahmen der Arbeit wird als *Unternehmen* das Glied der Wertschöpfungskette bezeichnet, welches das betrachtete System durch seinen Leistungserstellungsprozess herstellt.

<sup>15</sup> Als Kunde wird in der vorliegenden Arbeit das Glied der Wertschöpfungskette bezeichnet, welches das betrachtete System erwirbt und betreibt. Selbstredend kann es sich hierbei auch um ein Unternehmen handeln.

<sup>16</sup> Anschaffungskosten sind Aufwendungen, die für den Erwerb eines Vermögensgegenstands aufgewendet werden. Sie umfassen zudem die dem Vermögensgegenstand direkt zuordenbaren Aufwendungen, um diesen in einen betriebsbereiten Zustand zu versetzen (§ 255 I HGB) [Bec09, S. 56].

für Energie, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe, Bedienung und Software. Die **Instandhaltungskosten** umfassen die Kosten für Wartung und Instandhaltung des Produkts [EKL07, S. 124], [VDI2235, 8f.].

### 2.1.5 Nutzen

Um am Markt erfolgreich zu sein, müssen Neuprodukte zum Zeitpunkt ihrer Markteinführung einen Zusatznutzen aufweisen [Lüt07, S. 40ff.]. RINZA und SCHMITZ definieren **Nutzen**<sup>17</sup> als den subjektiven Gebrauchswert, welcher das Maß der Bedürfnisbefriedigung ausdrückt. Für die Bewertung von Nutzen können sowohl monetär sowie nicht monetär bewertbare Kriterien eingesetzt werden [RS92, S. 240]:

- **Monetär bewertbare Kriterien:** Zu diesen Kriterien zählen Leistung, Erlös, Umsatz, Ertrag sowie der Gewinn. *Leistung* steht als positive Komponente des kalkulatorischen Unternehmenserfolgs den Kosten gegenüber. Leistungen (Produkte) sind das Ergebnis eines Produktionsprozesses, für den bestimmte Kosten entstanden sind [Sch56, S. 10], [Kos69, S. 21]. *Erlös* setzt sich als Gegenbegriff zu Kosten immer mehr durch [Spr14b-ol]. Erlöse sind nach SCHMALENBACH *das Entgelt für an den Markt abgegebene Güter und Dienste* [Sch56, S. 13]. Als *Umsatz* wird der Wertbetrag bezeichnet, der durch verwertete Leistungen am Markt erzielt wurde [Gut58, S. 110]. Der *Ertrag* drückt die Betriebsleistung zum einen in Mengeneinheiten und zum anderen in Geldeinheiten aus. In Geldeinheiten ist der Ertrag nur dann gleich dem Umsatz (Erlös), wenn in der betrachteten Periode alle betrieblichen Leistungen verkauft wurden. Ansonsten ist der Ertrag die Summe aus Umsatzerlösen und dem Kostenwert der nicht verkauften Lagerbestände [Gut58, S. 33f.]. Der *Gewinn* bzw. *Verlust* eines Unternehmens ist die positive bzw. negative Differenz zwischen Erträgen und Aufwendungen oder Leistungen (Erlösen) und Kosten [Sch93, S. 738].
- **Nicht monetär bewertbare Kriterien:** Ein nicht monetär bewertbares Kriterium ist der *Nutzwert*, welcher das Ergebnis der Nutzwertanalyse ist. Die Nutzwertanalyse ist eine Methode zur Auswahl von Lösungsalternativen. Die Bewertung erfolgt für mehrere Lösungsalternativen. Den Gesamtnutzwert einer Alternative bildet die Summe aller Nutzwertbeiträge (Produkt aus Gewichtungsfaktor und Erfüllungsgrad) [RS92, S. 240].

Im Rahmen der Arbeit werden zur Bewertung des Nutzens sowohl monetär als auch nicht monetär bewertbare Kriterien herangezogen. Bei der Bewertung des Nutzens für ein Produkt ist neben dem Nutzen für den Kunden auch der Nutzen für das Unternehmen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird in der Arbeit zwischen Unternehmens- und Kundennutzen unterschieden, wie Bild 2-3 zeigt.

---

<sup>17</sup> Nutzen (auch wirtschaftlicher Wert) beschreibt die Fähigkeit eines Gutes, ein bestimmtes Kundenbedürfnis zu befriedigen [Spr14a-ol].

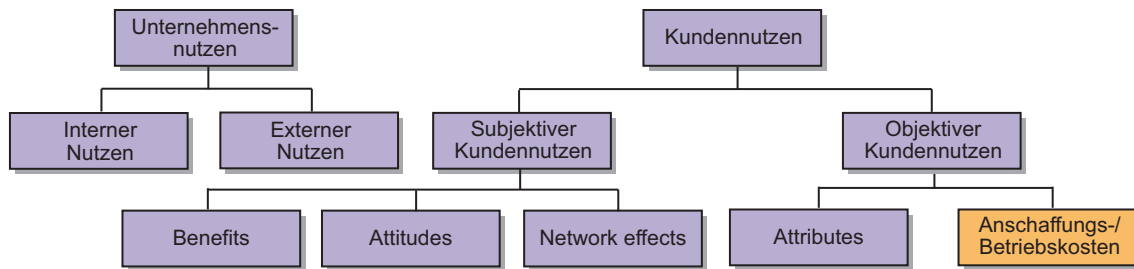


Bild 2-3: Nutzen für das Unternehmen und den Kunden

Der **Nutzen für das Unternehmen** ergibt sich nach PÜMPIN aus Nutzenpotentialen, die durch Aktivitäten des Unternehmens erschlossen werden und somit Nutzen für das Unternehmen und seine Stakeholder stiften [Püm92, S. 50]. Nutzenpotentialie entstehen durch Veränderungen der Umwelt, sogenannte Trends [Püm92, S. 66ff. u. S. 90]. Es wird zwischen externen und internen Nutzenpotentialen<sup>18</sup> unterschieden [Püm92, S. 91ff.]. Nutzenpotentialie können sich in kurzen Intervallen verändern. Sie durchlaufen insgesamt vier Phasen: Entstehung, Wachstum, Reife bis zum Niedergang. Unternehmen sollten ihre Aktivitäten auf Nutzenpotentialie konzentrieren, die sich in der Entstehungs- oder Wachstumsphase befinden [Püm92, S. 101].

Der **Nutzen für den Kunden** resultiert aus der Befriedigung seiner Bedürfnisse [Hom12, S. 497]. Dieser Nutzen kann objektiv oder subjektiv sein. Der objektive Kundennutzen ergibt sich aus der Funktionalität des Systems zum einen und den entstehenden Anschaffungs- und Betriebskosten zum anderen, die Wirtschaftlichkeit des Systems im engeren Sinn. In diese Bewertung gehen selbstverständlich auch Kriterien wie die Zuverlässigkeit oder Serviceleistungen für das System ein [EKL07, S. 60]. KELLER und KOTLER unterscheiden vier Dimensionen des Kundennutzens [SFC01, S. 784], [KKB+09, S. 353ff.]: Die Eigenschaften (*Attributes*) des Systems werden vom Kunden anhand der Systemeigenschaften und dessen Funktionsattributen bewertet. Der immaterielle, erlebbare Nutzen (*Benefits*) ergibt sich z.B. aus der Benutzungsfreundlichkeit des Systems. Die Einstellung des Kunden zu einem Produkt/System oder einem Unternehmen/einer Marke, resultiert aus der Bewertung der ersten Kategorien und umfasst zudem einen symbolischen Nutzen, bspw. Markenimage und Exklusivität (*Attitudes*). Nutzen resultiert für den Kunden zudem aus Synergieeffekten (*Network effects*), bspw. durch die Vernetzung von Systemen [Kel93, S. 2ff.], [SFC01, S. 784]. Die Nutzenkategorien *Benefits*, *Attitudes* und *Network effects* sind schwerer greifbar und zu bewerten als die funktionalen Eigenschaften des Systems (*Attributes*). Sie stellen die Basis für das Image einer Marke dar, weil sie Kundenerfahrung und -engagement voraussetzen und lassen sich dem subjektiv empfundenen Nutzen zuordnen [SFC01, S. 785].

<sup>18</sup> Externe Nutzenpotentialie umfassen das Markt-, Finanz-, Informatik-, Beschaffungs-, externes Humanpotential, Übernahme- und Restrukturierungs- sowie Kooperationspotential. Zu den internen Nutzenpotentialen zählen das Kostensenkungs-, Know-how-, Synergiepotential sowie organisatorisches Potential, internes Human- und das Bilanzpotential [Püm92, S. 91ff.].

## 2.2 Von der Mechatronik zu Intelligenten Technischen Systemen

Durch die zunehmende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik kann die Informationsverarbeitung mechatronischer Systeme um kognitive Funktionen erweitert und somit eine erhebliche Funktionssteigerung erreicht werden [Dum11, S. 19]. Über 80 Prozent der Innovationen in Deutschland beruhen auf dieser Entwicklung [Sie12, S. 15]. Neben der Informationstechnik stellen auch nicht-technische Disziplinen, wie die Kognitionswissenschaft oder Neurobiologie vielfältige Methoden, Techniken und Verfahren bereit, mit denen sich sensorische, aktorische und kognitive Funktionen in technische Systeme integrieren lassen. Auf diese Weise können Funktionen realisiert werden, welche bisher nur in biologischen Systemen vorkommen [GTD13, S. 49]. Das Ergebnis sind Systeme, die in der Lage sind, intelligent und flexibel auf veränderte Umgebungsbedingungen zu reagieren. So kann ein Verhalten realisiert werden, welches weit über die reaktiven und starren Verhaltensweisen konventioneller mechatronischer Systeme hinausgeht [Dum11, S. 19]. Im Folgenden wird der Innovationssprung von mechatronischen (vgl. Abschnitt 2.2.1), über adaptive (vgl. Abschnitt 2.2.2) hin zu Intelligenten Technischen System (vgl. Abschnitt 2.2.3) dargestellt.

### 2.2.1 Mechatronische Systeme

Mechatronik ist ein Kunstwort, welches aus den Begriffen Mechanik und Elektronik zusammengesetzt wurde [Com94, S. 46], [Roh08-ol], [Mor69], [Kah13, S. 10]. Der Begriff Mechatronik ist bis heute nicht einheitlich definiert und wird kontinuierlich weiterentwickelt. Kern der modernen Definitionen ist der synergetische Effekt durch das Zusammenwirken verschiedener Technologien, welche die Realisierung neuer Funktionen ermöglichen [VDI2206, S. 10ff.]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird Mechatronik gemäß der VDI-Richtlinie 2206 nach HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA als das Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik definiert [HTF96, S. 1], [VDI2206, S. 14]. Entsprechend der Anzahl der Definitionen existiert auch eine Vielzahl mechatronischer Anwendungen. Nach GAUSEMEIER werden mechatronische Systeme in zwei Klassen unterteilt [GF06, S. 3]:

Ziel der ersten Klasse mechatronischer Systeme ist die **räumliche Integration von Elektronik und Mechanik**. Auf diese Weise lässt sich eine hohe Dichte der Funktionsträger und somit eine Miniaturisierung der Systeme erreichen. Es resultieren Erfolgspotentiale insbesondere auf dem Gebiet der Aufbau- und Verbindungstechnik, bspw. mit Hilfe der Technologie MID (Molded Interconnected Devices) [GF06, S. 4].

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der zweiten Klasse mechatronischer Systeme. Sie fokussiert die Verbesserung des **kontrollierten Bewegungsverhaltens von Mehrkörpersystemen**. Diese Systeme bestehen aus vier Elementen: Grundsystem (mechanische Struktur), Sensor(en), Aktor(en) und der Informationsverarbeitung (vgl. Bild 2-4) [VDI2206, S. 10]. Die Elemente des Systems sind über Flüsse untereinander verknüpft. In technischen Systemen werden nach PAHL/BEITZ drei Flussarten unterschieden:

Stofffluss-, Energiefluss und Informationsfluss [FGG+13, S. 240ff.]. Das *Grundsystem* besteht aus einer mechanischen, elektromechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Struktur, die auch in Kombination auftreten können. Es bildet die Basis für die *physikalische Ebene*. Die *Sensorik* nimmt ausgewählte Zustandsgrößen<sup>19</sup> des Grundsystems sowie Umgebungseinflüsse auf. Die Sensoren liefern die Messwerte als Eingangsgröße für die *Informationsverarbeitung*, die die Basis für die *logische Ebene* bildet [VDI2206, S. 14f.]. Zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens dient die Regelung des Systems. Der Regelkreis<sup>20</sup> umfasst die folgenden drei Schritte: Erfassung der Regelgröße<sup>21</sup>, Abgleich mit der Führungsgröße<sup>22</sup> und Anpassung an die Führungsgröße. Über die Aktoren wird das Systemverhalten umgesetzt [GF06, S. 3].

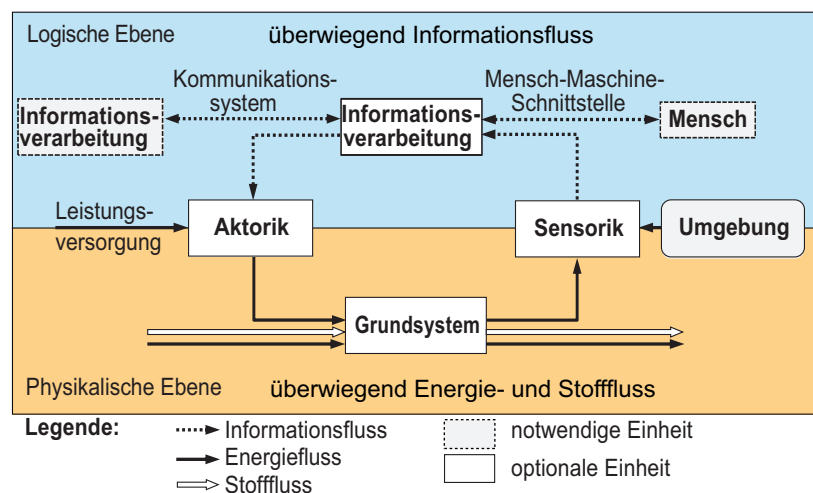


Bild 2-4: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach [VDI2206, S. 14]

In der Praxis können beide Klassen von mechatronischen Systemen auch in Kombination auftreten. Oftmals realisieren mechatronische Systeme der ersten Klasse Elemente der Systeme zweiter Klasse. Beispiele hierfür sind intelligente Sensoren und Aktoren [Ise08, S. 23f.].

Mechatronische Systeme umfassen eine Vielzahl von Elementen und Subsystemen auf verschiedenen Ebenen. Die resultierende Komplexität dieser Systeme erfordert eine geeignete Art der Strukturierung. LÜCKEL schlägt ein hierarchisches Ordnungsschema in

<sup>19</sup> In technischen Systemen werden Zustandsgrößen als physikalische Größen verstanden, durch deren Wert zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t_0$  der Ablauf des Systems für  $t > t_0$  eindeutig bestimmt ist, unter der Bedingung, dass die Eingangsgrößen des Systems für  $t > t_0$  gegeben sind [Föl08, S. 389].

<sup>20</sup> Ein Regelkreis beschreibt die Anordnung von Übertragungsgliedern im geschlossenen Wirkungsablauf einer Regelung [DIN60050, S. 59].

<sup>21</sup> Die Regelgröße ist die Ausgangsgröße der Regelstrecke, auf die eine oder mehrere Stellglieder wirken [DIN60050, S. 72].

<sup>22</sup> Die Führungsgröße legt den Sollwert der Regelgröße fest, wird aus der Zielgröße abgeleitet und ist Eingangsgröße für ein Vergleichsglied einer Regeleinrichtung [DIN 60050, S. 72].

Anlehnung an die funktionale Dekomposition des Bewegungsverhaltens vor [LHL01, S. 123f.]. **Mechatronische Funktionsmodule (MFM)** bilden die Basis des mechatronischen Gesamtsystems. Ihr Aufbau entspricht der Grundstruktur in Bild 2-4. Durch die Vernetzung verschiedener MFMs in einer integrierenden Tragstruktur entstehen **Autonome Mechatronische Systeme (AMS)**. Sie bilden die oberste Ebene des physikalisch gekoppelten Systems und treten nur einmal auf. **Vernetzte Mechatronische Systeme (VMS)** setzen sich aus AMS zusammen, die informationstechnisch miteinander verbunden sind. Diese Koppelung ermöglicht eine dynamische Veränderung der Struktur im Systembetrieb [Nau00, S. 19ff.], [LHL01, S. 123f.], [ADG+09, S. 11f.].

### 2.2.2 Adaptive Systeme

Die Entwicklung adaptiver Systeme begann in den 1950er Jahren mit der Entwicklung von Autopiloten für Hochleistungsflugzeuge. Der Begriff Adaption<sup>23</sup> ist nicht eindeutig definiert. Umgangssprachlich bedeutet adaptieren, dass ein Verhalten entsprechend neuer Bedingungen angepasst wird [AW95, S. 1f.]. Unter einem adaptiven System wird im Kontext von mechatronischen Systemen ein geregeltes System verstanden, welches sein Verhalten im Rahmen von Gütekriterien selbstständig an sich ändernde Eigenschaften des kontrollierten Prozesses und der zugehörigen Signale anpasst. Die Adaption wird in der Regel durch ein Nachstellen der Parameter, wie bspw. der Regelparameter, erreicht [ILM92, S. 6], [SR88, S. 18].

Das Grundsystem ist das zu regelnde System. Unabhängig der Umsetzung der Adaptionschleife ist diese durch drei charakteristische Teilprozesse geprägt [SR88, S. 18f.], [Nau00, S. 8ff.]:

- 1) **Identifikation:** Der Istwert der veränderlichen Größen wird kontinuierlich erfasst und entsprechende Kennwerte für das Grundsystem abgeleitet [SR88, S. 18f.]. Hierfür können je nach Art der Parameteränderung sowie der zur Verfügung stehenden Informationen unterschiedliche Verfahren, wie Messungen oder Schätzverfahren, eingesetzt werden [Nau00, S. 8ff.].
- 2) **Entscheidungsprozess:** Um das gewünschte Systemverhalten zu erreichen, werden Stellsignale für den adaptiven Eingriff mit Hilfe von Optimierungsverfahren berechnet [SR88, S. 18f.], [Nau00, S. 8ff.].
- 3) **Modifikation:** Durch Nachstellen der Regelparameter des Grundsystems erfolgt der Systemeingriff [SR88, S. 18f.], [Nau00, S. 8ff.].

---

<sup>23</sup> Vom lateinischen Verb *adaptare* = *anpassen, passend herrichten* [Dud13a-ol], [Dud13b-ol]. Adaption ist grundsätzlich von Adaptronik abzugrenzen. Der Begriff Adaptronik wurde vom VDI Technologiezentrum geprägt. Adaptronische Systeme sind geregelte Systeme, deren Funktionalität auf der Struktur und dem Verhalten von Multifunktionswerkstoffen beruhen [Jan07, S. 1f.].

Auf diese Weise können Regelungen ermöglicht werden, deren Eigenschaften und Bedingungen im Betrieb während der Entwicklung nur unvollständig bekannt sind [KKK95, S. 1f.]. Adaptive Regelungen<sup>24</sup> lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen [SR88, S. 22], [ILM92, S. 6] (vgl. Bild 2-5):

**Feedforward Adaptive Controller** werden eingesetzt, wenn sich Änderungen im Prozessmodell auf Basis von messbaren Signalen ermitteln lassen und ihr Einfluss auf den Prozess bekannt ist. Die direkte adaptive Regelung erfolgt ohne Zwischenschritt durch eine Schätzung der Regelparameter. Lassen sich die Veränderungen im Prozess nicht durch direkte Messung der Prozessparameter ermitteln, wird ein **Feedback Adaptive Controller** eingesetzt. Bei der indirekten adaptiven Regelung erfolgt die Ermittlung der Regelparameter indirekt auf Basis eines geschätzten Prozessmodells [ILM92, S. 6ff.], [SR88, S. 22].

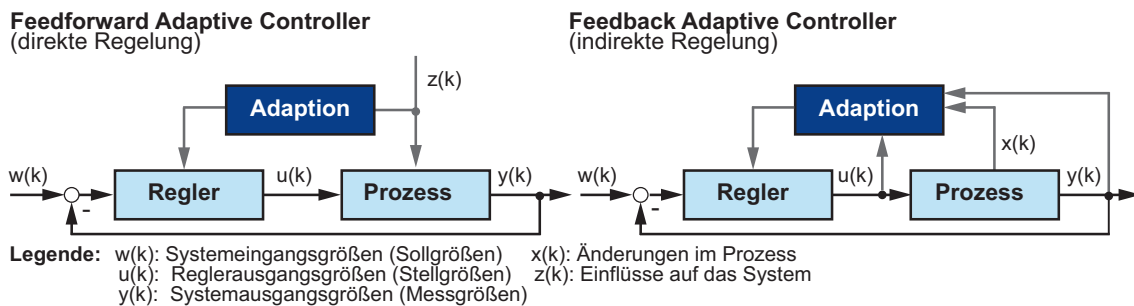


Bild 2-5: Direkte und indirekte adaptive Regelung nach [ILM92, S. 7f.]

## 2.2.3 Intelligente Technische Systeme

Durch die Erweiterung der Informationsverarbeitung mechatronischer Systeme um kognitive Funktionen werden sogenannte Intelligente Technische Systeme realisiert [Dum11, S. 19], [DAG13, S. 112]. Die hierzu notwendige kognitive Informationsverarbeitung teilt sich nach STRUBE in drei Ebenen: „Nicht kognitive Regulierung<sup>25</sup>“, „Assoziative Regulierung<sup>26</sup>“ und „Kognitive Regulierung<sup>27</sup>“ und wird durch das Dreischichtenmodell für die Verhaltensanpassung beschrieben [Str98, S. 96f.].

<sup>24</sup> Adaptive Regelungen beschreiben nach DIN-Norm 60050 Regelungen, die in der Lage sind die Struktur oder Parameter der Regeleinrichtung selbsttätig gemäß veränderter Betriebsbedingungen zu verändern [DIN60050, S. 66].

<sup>25</sup> Auf der untersten Ebene der „Nicht kognitiven Regulierung“ laufen kontinuierlich arbeitende Steuerungen, rückgekoppelte Regelkreise und Reflexe ab [Dum11, S. 29].

<sup>26</sup> Die „Assoziative Regulierung“ verknüpft Stimuli mit bekannten Verhaltensmustern. Es wird ein Wechsel zwischen verschiedenen Verhaltensmustern ermöglicht [Str98, S. 98f.].

<sup>27</sup> Die oberste Ebene die „Kognitive Regulierung“ setzt eine zielorientierte und planende Verhaltenssteuerung um [Dum11, S. 29].



Intelligente Technische Systeme zeichnen sich durch vier zentrale Eigenschaften aus: Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich [GTD13, S. 49]. Sie übertreffen somit die Funktionalität mechatronischer und eingebetteter Systeme<sup>28</sup>. Diese Perspektive wird durch Schlüsselwörter wie “Things that Think<sup>29</sup>”, „Cyber-Physical Systems“ und „Industrie 4.0“ beschrieben [DAG13, S. 112]. Sie finden derzeit große Beachtung u.a. in Branchen, wie der Automobilindustrie, der Medizintechnik, im Maschinen- und Anlagenbau sowie der Automatisierungstechnik.

**Cyber-Physical Systems (CPS)** sind Systeme mit eingebetteter Software, die mittels integrierter Sensorik physikalische Informationen unmittelbar erfassen und über Wirkketten die physikalischen Vorgänge durch die Aktorik beeinflussen können [aca11, S. 13], [Bro10, S. 17]. Sie weisen ein hohes wirtschaftliches Potential sowie erheblichen gesellschaftlichen Nutzen auf [Bro10, S. 25ff.]. Die Anwendungsfelder lassen sich in intelligente Mobilität, Fernbetreuung und -diagnose in der Medizin, intelligente Energienetze sowie intelligent vernetzte Produktion teilen [KLW11, S. 2], [GB12, S. 29]. Die systematische Entwicklung dieser Systeme erfordert die Bereitstellung von wissenschaftlichen Grundlagen einschließlich Modellierung und Analyse. Ziel ist die umfassende Beherrschung der Entwicklung und Evolution von CPS hinsichtlich Qualität, Kosten und Time-to Market [Bro10, S. 27f.]. Somit werden neue Geschäftsperspektiven sowie neue innovative Infrastrukturen für die Arbeit eröffnet [KWH13, S. 30].

Intelligente Technische Systeme sind wesentliche Innovationstreiber für Export- und Wachstumsmärkte der deutschen Industrie. Durch ihren Einsatz lässt sich somit die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie maßgeblich steigern [aca11, S. 5]. Die Bundesregierung hat diese Nutzenpotentiale erkannt und *Industrie 4.0* zu einem Kernelement ihrer Hightech-Strategie erklärt [Sen13, S. 1].

Der BMBF-Spitzencluster Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe – it’s OWL – gilt als Wegbereiter für Industrie 4.0 [GDJ+14, S. 336ff.]. Ziel der 174 beteiligten Unternehmen und Forschungseinrichtungen ist die erfolgreiche Einführung von Intelligenten Technischen Systemen in der industriellen Anwendung. Hierzu wird im Rahmen des Projekts ein Technologiekonzept entwickelt, welches auf den Arbeiten des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs (SFB) 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ aufbaut [GTD13, S. 50f.], [GDJ+14, S. 336f.], [GRS14, S. 1ff.].

---

<sup>28</sup> Eingebettete Systeme (engl. Embedded Systems) sind technische Systeme mit integrierten Mikroprozessoren, deren Ziel die Steuerung einer Funktion oder einer Bandbreite von Funktionen ist [Hea03, S. 2].

<sup>29</sup> „Things that Think“ bezeichnet die Kombination von Alltagsgegenständen (bspw. Schuhe, Möbelstücke oder Spielzeug) mit eingebetteten Digitalsystemen und Kommunikationstechnik [HPT97, S. 13].

## 2.3 Selbstoptimierende Systeme

Intelligente Technische Systeme werden bereits heute durch den Einsatz von Selbstoptimierung in mechatronischen Systemen ermöglicht. Sie werden aufgrund ihrer hohen Nutzenpotentiale im Rahmen dieser Arbeit stellvertretend für Intelligente Technische Systeme betrachtet. Im Rahmen des SFB 614 wurde das Paradigma der Selbstoptimierung für den Maschinenbau und verwandte Branchen erschlossen:

*„Unter Selbstoptimierung (self-optimization) eines technischen Systems wird die endogene Anpassung der Ziele des Systems auf veränderte Einflüsse und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Parameter und ggf. der Struktur und somit des Verhaltens dieser Systeme verstanden. Damit geht Selbstoptimierung über die bekannten Regel- und Adaptionstrategien wesentlich hinaus; Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter „Teilintelligenz“, die in der Lage sind, selbständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren“ [SFB04, S. 11], [ADG+09, S. 5].*

### 2.3.1 Aspekte eines selbstoptimierenden Systems

Ein selbstoptimierendes System ist im Grunde ein technisches System im Sinne der Begriffsdefinition in Abschnitt 2.1.2. Selbstoptimierende Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Lage sind, im Systembetrieb auf Basis von äußeren Einflüssen ihre internen Systemziele anzupassen [SFB04, S. 11]. Die wesentlichen Aspekte eines selbstoptimierenden Systems werden in Bild 2-6 dargestellt.

**Einflüsse** auf das selbstoptimierende System können störend oder unterstützend sein. Sie gehen von der Umwelt, vom Benutzer oder von anderen Systemen als externe Einflussquellen aus. Weiterhin kann das System auf sich selbst bzw. externe Einflussquellen wirken [ADG+09, S. 8].

Die Ziele eines selbstoptimierenden Systems beschreiben die geforderten, gewünschten oder zu vermeidenden Systemeigenschaften. Ziele werden im Systementwurf vorausgedacht, die Zielausprägung erfolgt hingegen erst während des Systembetriebs. Es werden drei Arten von Zielen unterschieden: *Externe Ziele* werden dem System von außen bspw. durch den Benutzer oder andere Systeme vorgegeben. Als *inhärente Ziele* werden diejenigen bezeichnet, die auf den Entwurfszweck des Systems abzielen. *Interne Ziele* basieren auf externen Zielen sowie inhärenten Zielen und sind Gegenstand der Optimierung. Sie können untereinander in Beziehung gestellt werden und bilden das interne **Zielsystem**. In Abhängigkeit der Komplexität wird dies durch einen Zielvektor, eine Zielhierarchie oder einen Zielgraphen abgebildet [ADG+09, S. 20f.].

Bei einem selbstoptimierenden System handelt es sich, wie beim mechatronischen System, um ein Mehrkörpersystem mit kontrolliertem Bewegungsverhalten (vgl. Abschnitt 2.2.1). Dieses (Bewegungs-) **Verhalten** lässt sich mittels eines mathematischen Modells

beschreiben und bildet die Summe aller situationsspezifischen Aktionen. Das Systemverhalten orientiert sich an den internen Systemzielen. Eine Anpassung des Verhaltens kann durch eine Parameter- oder eine Strukturanpassung erfolgen [ADG+09, S. 8].

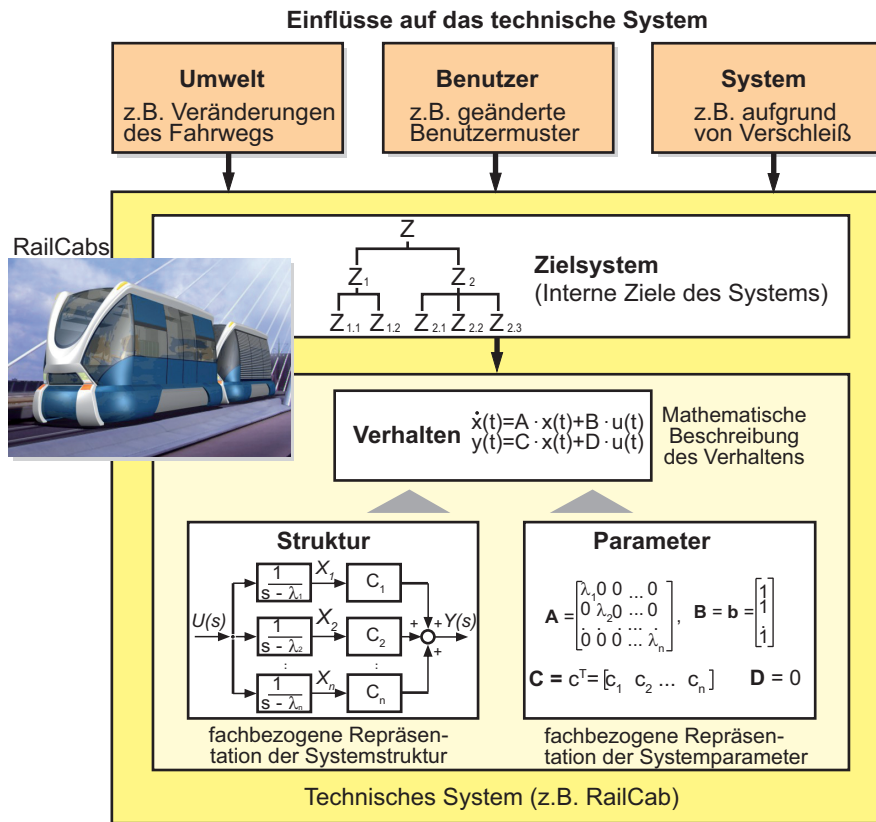


Bild 2-6: Aspekte eines selbstoptimierenden Systems [SFB04, S. 20], [SFB08, S. 18]

**Parameteranpassung** bezeichnet die Anpassung eines Systemparameters<sup>30</sup>. Unter **Strukturanpassung** wird eine Änderung der Anordnung und Beziehung zwischen den Systemelementen verstanden [ADG+09, S. 8]. Die Struktur eines Systems beschreibt die Gesamtheit der Beziehungen zwischen den Systemelementen [DIN60050, S. 12]. Es lassen sich zwei Arten der Strukturanpassung unterscheiden. Bei der *kompositionalen Anpassung* werden neue oder bestehende Systemelemente eingefügt, entnommen, aktiviert und deaktiviert. Durch *Rekonfiguration* werden die Anordnung und die Beziehungen der bestehenden Systemelemente verändert [ADG+09, S. 8], [SFB08, S. 18f.]. Rekonfiguration kann auf jedem Systemlevel durchgeführt werden. Auf Hardwareebene lässt sich dies durch dynamisch rekonfigurierbare Hardware realisieren, bspw. durch Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) [GKP+14, S. 21].

<sup>30</sup> Ein Systemparameter ist eine charakteristische variable Größe, welche systemintern die Beziehung zwischen variablen Größen kennzeichnet [DIN60050, S. 12].

### 2.3.2 Selbstopoptimierungsprozess

Die Verhaltensanpassung des selbstopoptimierenden Systems erfolgt im Rahmen des sogenannten Selbstopoptimierungsprozess‘ in drei Aktionen [SFB08, S. 19f.], [ADG+09, S. 6]:

1. **Analyse der Ist-Situation:** Die betrachtete Ist-Situation ergibt sich aus der Aufzeichnung der relevanten Zustandsgrößen des Systems sowie aus der Beobachtung des Systemumfelds und den daraus resultierenden äußeren Einflüssen. Die notwendigen Informationen werden zum einen durch die Sensorik des Systems direkt und zum anderen durch Kommunikation mit anderen Systemen indirekt ermittelt. Der Systemzustand wird gespeichert und so die Voraussetzung für eine intelligente und lernende Verhaltensanpassung des Systems geschaffen. In dieser Aktion wird überprüft ob die aktuell verfolgten Ziele für die gegenwärtige Situation angemessen sind [SFB08, S. 19f.], [ADG+09, S. 6].
2. **Bestimmung der Systemziele:** Neue Ziele des Systems werden durch Auswahl, Anpassung oder Generierung der Ziele gewonnen. Unter Auswahl wird hierbei die Selektion einer Alternative aus einer vorab festgelegten und endlichen Menge von Zielen verstanden. Eine Zielanpassung erfolgt durch die Veränderung der Ausprägung bzw. Gewichtung der aktuellen Ziele. Ziele werden generiert, wenn diese unabhängig der bestehenden Ziele neu erzeugt werden [SFB08, S. 19f.], [ADG+09, S. 6].
3. **Anpassung des Systemverhaltens:** Die im Rahmen der Zielbestimmung ermittelten Ziele erfordern in der dritten Aktion die Anpassung des Systemverhaltens. Die Verhaltensanpassung erfolgt, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, durch eine Struktur- oder Parameteranpassung. Die Informationsverarbeitung leitet die Ergebnisse weiter und stößt somit die Verhaltensanpassung über die Aktorik an [SFB08, S. 19f.], [ADG+09, S. 6].

Nur wenn diese drei Aktionen wiederkehrend ausgeführt werden, findet im System ein Selbstopoptimierungsprozess statt. Hierbei sind die drei Aktionen nicht zwangsläufig in der vorgegebenen Reihenfolge zu durchlaufen [SFB08, S. 20], [ADG+09, S. 6]. Auf diese Weise sorgt die selbstopoptimierende Regelung für ein optimales Systemverhalten. Diese Art der Regelung ist als Ergänzung zu den bekannten Regelungsverfahren zu verstehen (vgl. Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2) [ADG+09, S. 28], [SFB08, S. 52].

### 2.3.3 Informationsverarbeitung selbstopoptimierender Systeme

Die Umsetzung des Selbstopoptimierungsprozesses erfordert eine geeignete Strukturierung der Informationsverarbeitung in Form des Operator-Controller-Moduls (OCM) nach NAUMANN [Nau00, S. 27ff.], [SFB08, S. 52], [ADG+09, S. 9]. Bild 2-7 zeigt die Gliederung des OCM in die drei Ebenen Controller, reflektorischer Operator und kognitiver Operator.

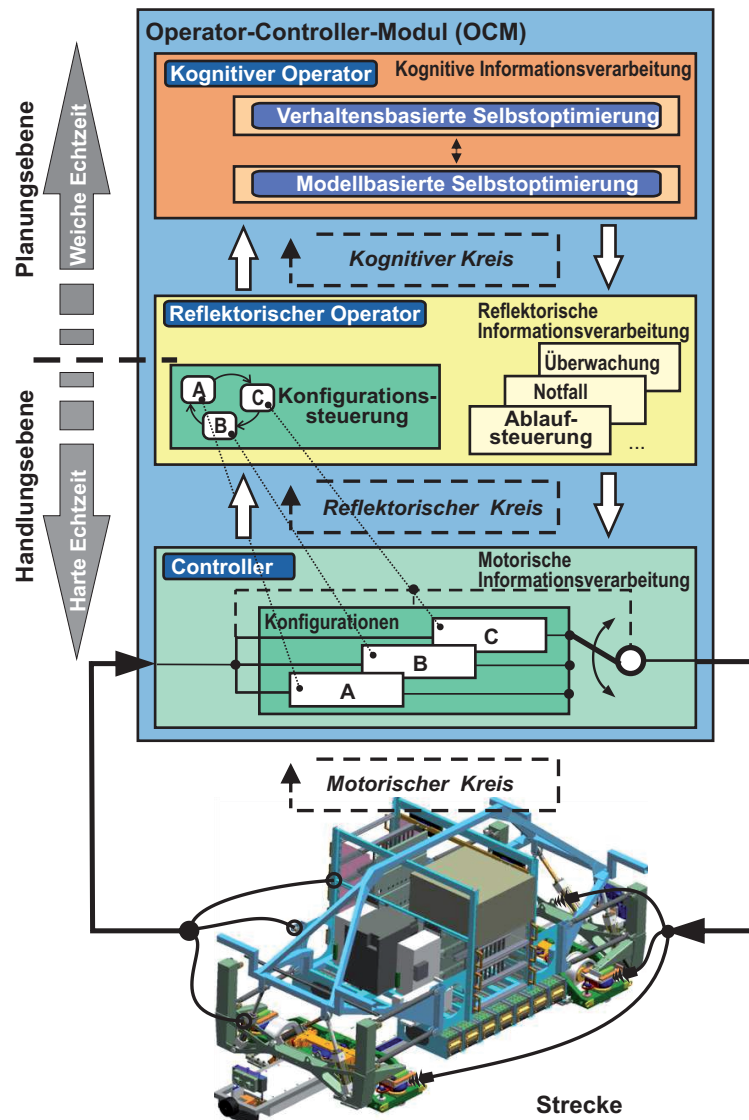


Bild 2-7: Struktur des Operator-Controller-Modul (OCM) [ADG+09, S. 14]

Der **Controller** bildet die unterste Ebene des OCM. Seine Aufgabe ist die Beeinflussung des Grundsystems zur Erreichung eines gewünschten dynamischen Verhaltens. Als *motorischer Kreis* wird hierbei der innerste Regelkreis bezeichnet, der die Messsignale in direkter Wirkkette verarbeitet, Stellsignale ermittelt und diese ausgibt. Auf dieser Ebene arbeitet die Software quasi-kontinuierlich und muss harten Echtzeitbedingungen genügen. Der Controller kann mehrere Regler umfassen und zwischen diesen umschalten [SFB08, S. 21], [ADG+09, S. 14f.].

Der **reflektorische Operator** überwacht und steuert den Controller. Er ist über den *reflektorischen Kreis* mit dem Controller verbunden. Der reflektorische Operator greift nicht direkt auf die Aktorik des Systems zu, sondern initiiert eine Parameter- oder Strukturänderung, um den Controller zu modifizieren. Dieser Eingriff erfolgt unter harter Echtzeit. Funktionen, wie Ablaufsteuerung, Überwachungs- und Notfallprozesse, werden vom reflektorischen Operator übernommen. Er arbeitet überwiegend ergebnisorientiert

und ist die Verbindung zur kognitiven Ebene des OCM. Als Verbindungselement dient hierzu ein Interface zwischen den nicht echtzeitfähigen, bzw. mit weicher Echtzeit arbeitenden Elementen des kognitiven Operators und dem Controller. Die ankommenden Signale werden durch den reflektorischen Operator gefiltert, welcher diese in die unterlagerten Ebenen einbringt. In einem zusammengesetzten selbstoptimierenden System ist der reflektorische Operator zudem für die Echtzeitkommunikation zwischen mehreren OCM verantwortlich [SFB08, S. 21f.], [ADG+09, S. 15].

Die oberste Hierarchieebene bildet der **kognitive Operator**. Durch die Anwendung vielfältiger Methoden kann das System auf dieser Ebene Wissen über sich und seine Umgebung zur Verbesserung des Systemverhaltens sammeln und anwenden. Der Schwerpunkt wird dabei auf kognitive Fähigkeiten zur Durchführung einer individuellen Selbstoptimierung gelegt. Funktionen zur Planung und Bewertung der aktuellen Zielvorgaben liefern verhaltensorientierte Optimierungsverfahren, während die modellorientierten Verfahren eine vorausschauende und vom System zeitlich entkoppelte Optimierung ermöglichen. Der kognitive Operator kann im Gegensatz zum Controller oder reflektorischen Operator auch asynchron zur Realzeit arbeiten. Um dennoch die Gültigkeit der Resultate des Selbstoptimierungsprozesses sicherzustellen, ist aufgrund der veränderlichen Umgebungsbedingungen eine Antwort innerhalb einer gewissen Zeitspanne notwendig. Folglich unterliegt der kognitive Operator weichen Echtzeitbedingungen [SFB08, S. 23], [ADG+09, S. 15f.].

### Optimierungsverfahren

Optimierungsverfahren bilden die Grundlage für die zweite und dritte Aktion des Selbstoptimierungsprozess‘ und werden im kognitiven Operator durchgeführt [SFB08, S. 23], [ADG+09, S. 15]. Optimierungsverfahren sind wesentlicher Bestandteil zur Auflösung von Konflikten im Betrieb. Konflikte können durch Widersprüche in den Anwendungssituationen oder durch Schwachstellen auftreten. Mit Hilfe von Optimierungsverfahren können konkrete Ziele für die aktuelle Anwendungssituation bestimmt werden. Somit werden auch Konflikte gelöst, welche in den frühen Phasen des Entwurfs nicht allgemeingültig aufgelöst werden konnten. Zur Realisierung der Selbstoptimierung werden Verfahren der mathematischen Optimierung eingesetzt, die eine **modellorientierte Optimierung** ermöglichen (bspw. durch Mehrzieloptimierung oder Optimalsteuerung). Sind die physikalischen Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen des Systems bekannt, werden diese mathematisch durch Differentialgleichungen in (physikalischen) Modellen beschrieben [ADG+09, S. 125ff.]. Weiterhin werden Verfahren aus den Bereichen künstliche Intelligenz und Soft Computing verwendet, welche das System als Black-Box betrachten und eine **verhaltensorientierte Optimierung** ermöglichen [ADG+09, S. 123f.]. Es handelt sich im Wesentlichen um Lern- und Planungsverfahren, bei denen die relevanten Eingangsgrößen direkt auf die jeweilige Ausgangsgröße abgebildet werden. Die Bestimmung der Auswirkungen der Ein- auf die Ausgangsgrößen sowie ggf. darauf aufbauend das Erlernen optimaler Reiz-Reaktions-Schemata ist Ziel der

Lernverfahren. Bei den Planungsverfahren werden hingegen für die Bestimmung der optimalen Verhaltensweisen nicht nur die aktuelle Situation, sondern auch mögliche zukünftige Verhaltensweisen des Systems vorausgedacht [ADG+09, S. 135ff.]. Beide Ansätze können zudem in Kombination als **hybride Optimierungsverfahren** eingesetzt werden. Ein Beispiel für hybride Verfahren ist die Hybride Planung. Verhaltensorientierte Verfahren, insbesondere die Planungsverfahren, betrachten die Zustandsübergänge nur diskret. Zumindest Teile des selbstoptimierenden Systems und dessen Prozesse sollten kontinuierlich beschrieben werden, da diese Systeme auf mechatronischen Systemen basieren. Dies wird durch Hybride Planung ermöglicht [AK09, S. 55ff.], [ARE10, S. 1ff.].

### Struktur selbstoptimierender Systeme

Die Realisierung der Aktionen des Selbstoptimierungsprozesses kann im Rahmen der OCM-Architektur auf vielfältige Art und Weise erfolgen [ADG+09, S. 16], [SFB08, S. 23]. In Abhängigkeit der Elemente die am Selbstoptimierungsprozess beteiligt sind können zwei Arten von selbstoptimierenden Systemen unterschieden werden. Wird der Selbstoptimierungsprozess von den Elementen eines isolierten Systems ausgeführt, wird von einem **individuellen selbstoptimierenden System** gesprochen. Seine Subsysteme dürfen hierbei nicht mit eigenen Zielen am Selbstoptimierungsprozess des Systems beteiligt sein. Ist dies der Fall, handelt es sich um ein **zusammengesetztes selbstoptimierendes System**, das u.a. als Multiagenten-System mit interagierenden OCM realisiert werden kann [ADG+09, S. 9 u. S. 16ff.], [SFB08, 24 f.]. Die hierarchische Strukturierung entspricht dabei der eines mechatronischen Systems nach LÜCKEL (vgl. Abschnitt 2.2.1) [SFB08, S. 16], [ADG+09, S. 10f.].

#### 2.3.4 Beispiele für selbstoptimierende Systeme

Die Methoden und Verfahren zur Entwicklung selbstoptimierender Systeme wurden im SFB 614 an verschiedenen Demonstratoren erprobt. Bild 2-8 zeigt eine Auswahl der Demonstratoren.

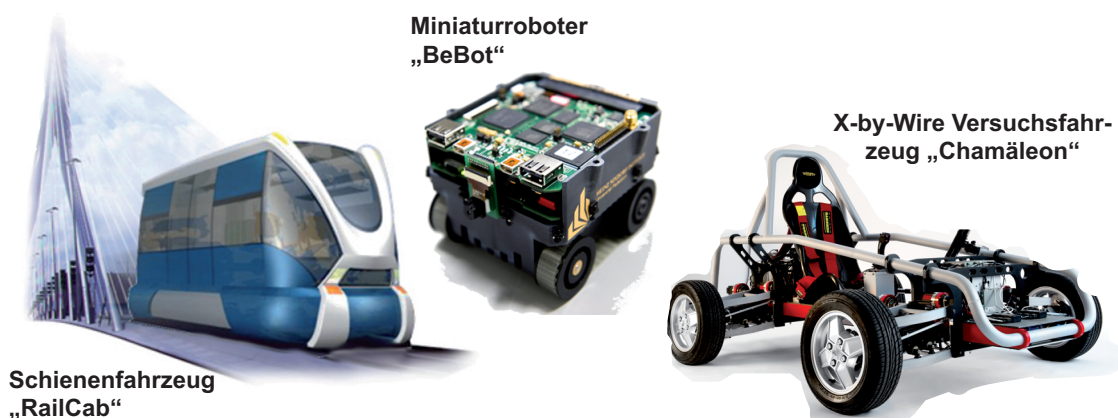


Bild 2-8: Demonstratoren des SFB 614 als Beispiele für selbstoptimierende Systeme (Quelle: SFB 614)

Die Neue Bahntechnik Paderborn/RailCab<sup>31</sup> ist ein innovatives Bahnsystem, das als umfassende Versuchsanlage im Maßstab 1:2,5 realisiert ist. Den Kern des Systems bilden autonome Fahrzeuge (**RailCabs**) für den Personen- und Gütertransport, die nach Bedarf und nicht nach Fahrplan fahren. Sie handeln proaktiv und bilden beispielsweise Konvois, um den Energiebedarf zu reduzieren. Die Module Antriebs- und Bremssystem, Feder- und Neigesystem sowie Energiemanagement des RailCabs wie auch ihr Zusammenwirken beruhen auf Selbstoptimierung. Im Rahmen des SFB 614 wurden die Funktionsmodule des RailCabs ebenfalls zur Erprobung der Selbstoptimierung als Prüfstände umgesetzt [ADG+09, S. 29ff.]. Zur Demonstration ihres Zusammenwirkens wurden diese Prüfstände zu einem Prüfstand vernetzt, dem sogenannten Vernetzten Prüfstand [SB14, S. 46].

Der Miniaturroboter **BeBot** dient als Technologieplattform für die Forschung in den Bereichen dynamisch rekonfigurierbarer Systeme, Multiagenten-Systeme sowie Schwarmintelligenz. Die Grundlage hierfür bildet die Kombination von rekonfigurierbaren Logikbausteinen (FPGA) und leistungsfähigen Mikrocontrollern. Zudem ist er Versuchsträger für die Technologie Molded Interconnect Devices (MID) [JKK+14, S. 50ff.].

Das X-by-Wire Versuchsfahrzeug **Chamäleon** ist ein vollaktives mechatronisches Versuchsfahrzeug, das ausschließlich elektrisch aktuiert ist. Es wird komplett by-wire gesteuert, d.h. es gibt keine mechanische Kopplung zwischen dem Bedienelement und der Aktorik. Ziel im Kontext des SFB ist eine selbstoptimierende Fahrzeugregelung hinsichtlich der Vertikal- und Längsdynamik, das Energiemanagement sowie die Rekonfiguration der Fahrwerksaktuatorik [RT14, S. 56ff.]. Eine detailliertere Darstellung der Anwendungen selbstoptimierender Systeme werden u.a. in [ADG+09] und [BHH+14] gegeben.

Anwendungsbeispiele aus der Industriellen Praxis sind die Innovationsprojekte „itsowl-ReSerW“ und „itsowl-Self-X-Pro“ des Spitzenclusters it's OWL. Im Projekt „itsowl-ReSerW“ wird eine ressourceneffiziente selbstoptimierende Großwäscherei mit dem Ziel entwickelt, die Effizienz z.B. hinsichtlich der eingesetzten Ressourcen Wasser und Waschmittel in der industriellen Anwendung zu erhöhen. Hierdurch ergibt sich u.a. großes Potential zur Erschließung neuer Märkte [GTD13, S. 51f.], [Bun14, S. 118f.]. Die Entwicklung einer selbstoptimierenden Stanz-Biege-Maschine, die in der Lage ist Unregelmäßigkeiten im Produktionsprozess eigenständig zu korrigieren, ist Gegenstand des Innovationsprojekts „itsowl-Self-X-Pro“. Auf diese Weise lassen sich bei bestmöglicher Qualität die Fertigungskosten weiter reduzieren sowie die Produkte weiter miniaturisieren [Kal13, S. 38f.], [Bun14, S. 106f.].

---

<sup>31</sup> Website des Projekts „Neue Bahntechnik Paderborn/RailCab“ der Universität Paderborn: <http://nbp-www.upb.de>.



## 2.4 Nutzeninnovation durch Intelligente Technische Systeme

Immer wieder scheitern Innovationen<sup>32</sup> am Markt, weil sie letztlich zu geringen oder keinen Nutzen für die Stakeholder stiften [Sch12, S. 1]. Ursache hierfür sind häufig mangelhafte Marktanalysen [DNL96, S. 81]. Um erfolgreich zu sein, ist somit eine Differenzierung über den Nutzen bei gleichzeitig niedrigen Kosten anzustreben. Nach KIM und MAUBORGNE wird dies durch eine Nutzeninnovation ermöglicht. Zu einer Nutzeninnovation kommt es, wenn die Erschließung von Nutzenpotentialen durch ein Unternehmen sowohl die Kostenstruktur als auch den Nutzen des Systems positiv beeinflusst [KM05, S. 12ff.].

Das enge Zusammenwirken von Mechanik, Elektro- und Informationstechnik ermöglicht neue prinzipielle Lösungen, die das Kosten/Nutzen-Verhältnis und somit die Wirtschaftlichkeit bestehender Systeme erheblich verbessern können [Ben05, S. 7]. Mechatronik stellt somit ein Erfolgspotential<sup>33</sup> für die Gestaltung neuer Systeme dar [VDI2206, S. 3]. Ihr Nutzen resultiert aus der Innovationsdynamik der Informationstechnik und Elektronik [Sch00, S. 33]. Diese Innovationsdynamik ermöglicht durch die Erweiterung der Informationsverarbeitung mechatronischer Systeme um kognitive Funktionen Intelligente Technische Systeme und die damit einhergehende erhebliche Funktionssteigerung, welche durch die vier Eigenschaften charakterisiert wird [Dum11, S. 19], [GTD13, S. 49]:

- **Adaptiv:** Diese Systeme reagieren autonom und flexibel auf sich verändernde Umgebungsbedingungen. Sie sind in der Lage zu lernen und optimieren ihr Verhalten während des Betriebs.
- **Robust:** Intelligente Technische Systeme sind in der Lage sogar in Situationen, die nicht während der Entwicklung des Systems vorausgedacht wurden, ein akzeptables Verhalten zu realisieren. Auf diese Weise lassen sich Unsicherheiten bis zu einem gewissen Grad kompensieren.
- **Vorausschauend:** Diese Systeme können, basierend auf gesammelten Erfahrungen, kommende Zustände und Situationen erkennen. Sie können somit mögliche Gefahren erkennen und ihr Verhalten entsprechend anpassen.
- **Benutzungsfreundlich:** Intelligente Technische Systeme passen ihr Verhalten den Bedürfnissen des jeweiligen Benutzers an. Sie interagieren sehr eng mit dem Benutzer, der ihr Verhalten immer nachvollziehen kann.

---

<sup>32</sup> SCHUMPETER definiert Innovation wie folgt: „*Technological change in the production [...] the opening up of new markets [...] the setting up of new business organizations [...] – in short, any ‘doing things differently’ in the realm of economic life – all these are instances of what we shall refer to by the term Innovation*“ [Sch39, S. 84], [Ech14, S. 10].

<sup>33</sup> Nach GÄLWEILER können neue Erfolgspotentiale durch neue Lösungstechnologien entstehen [Gäl05, S. 159].

Die in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Beispiele für Intelligente Technische Systeme zeigen die Funktionssteigerung und den daraus resultierenden Nutzen, welcher sich aus diesen Eigenschaften ergibt. So lässt sich bspw. die Ressourceneffizienz oder Prozessqualität von Systemen weiter steigern oder Kosten reduzieren [GTD13, S. 51f.], [Kal13, S. 38f.]. Durch den Einsatz einer selbstoptimierenden Betriebsstrategie für ein hybrides Energiespeichersystem bestehend aus Nickel-Metall-Hydrid Batterien und Doppelschichtkondensatoren konnte für Elektrofahrzeuge im Stadtverkehr bei gleichbleibenden Herstellkosten der Energieverbrauch um 7,7 Prozent und die Verlustleistung um 15 Prozent reduziert werden [Rom13, S. 21 u. S. 36 u. S. 174]. Weiterhin konnte der Radverschleiß des RailCabs durch eine selbstoptimierende Spurführung reduziert und der Wirkungsgrad durch eine situationsbezogene Luftspaltverstellung signifikant erhöht werden, um nur einige Beispiele zu nennen [ADG+09, S. 58], [Sch13, S. 210ff.]. In der Betriebsphase des Systems spielt dessen Verlässlichkeit<sup>34</sup> zudem eine entscheidende Rolle, da diese die Funktionsfähigkeit und Verfügbarkeit des Systems beeinflusst, mit erheblichen Auswirkungen auf die Instandhaltungs- und Wartungskosten. Auch weitere Folgekosten für das Unternehmen wie z.B. Gewährleistungs- und Haftungskosten sowie Imageverlust können resultieren [DIN60300, S. 9f.]. Die Verlässlichkeit von Intelligenten Technischen Systemen kann durch den Einsatz von Selbstoptimierung gesteigert werden [DHK+09, S. 6]. Es liegt nahe, dass hierdurch die Kosten für die Instandhaltung und Wartung sowie weitere Folgekosten dieser Systeme reduziert werden können.

Die Beispiele zeigen, dass durch Intelligente Technische Systeme sowohl die Kosten für den Kunden gesenkt als auch der Nutzen gesteigert werden kann. Die Technologie bietet somit das Potential einer Nutzeninnovation nach KIM und MAUBORGNE. Die Systemeigenschaften bieten die Möglichkeit über die sechs Nutzen-Hebel (Produktivität, Einfachheit, Leichtigkeit, Risiko, Spaß und Image sowie Umweltfreundlichkeit) einen besonderen Nutzen für die Stakeholder zu stiften [KM05, S. 110ff.]. Um mit einem Intelligenten Technischen System als Nutzeninnovation am Markt erfolgreich zu sein, sind daher im Rahmen der strategischen Produktplanung die Nutzenpotentiale zu identifizieren und in der Entwicklung durch die technische Lösung unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zu erschließen.

---

<sup>34</sup> Nach LAPRIE ET AL. ist die Verlässlichkeit eines Systems die Fähigkeit Systemausfälle zu verhindern, welche, wenn sie vermehrt auftreten, schwer zu akzeptieren sind. Verlässlichkeit umfasst die Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Integrität sowie Wartbarkeit des Systems [LAR+04, S. 13]. Diese Definition wurde im Rahmen des SFB 614 für die Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme übernommen [IMP+14, S. 13].

## 2.5 Entwicklung Intelligenter Technischer Systeme

Die technologische Entwicklung hin zu Intelligenten Technischen Systemen steigert die Produktkomplexität in der Entwicklung. Grund dafür sind die wachsende Interdisziplinarität, die hohe Schnittstellenvielfalt, die zunehmende Produktvarianz und die kürzer werdenden Produktlebenszyklen [GDS+13, S. 16f.]. Für diese Systeme bedarf es verbesserter Entwicklungsprozesse, -methoden und -werkzeuge. Diese ermöglichen u.a. die frühzeitige Absicherung von Konzepten, der Produktivitätsgewinne in Bezug auf Qualität, Kosten, Zeit etc. sowie die Komplexitätsbeherrschung von disziplinübergreifenden Systemen [DAB+10, S. 115]. Die im Rahmen der Arbeit angestrebte Systematik hat eine wirtschaftlichkeitsorientierte Konzipierung zum Ziel. Sie soll die Entwickler bei der Entwicklung und Auswahl von Lösungsalternativen nach dem Ziel der Wirtschaftlichkeit unterstützen. Insbesondere in frühen Phasen ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu bewerten, ob eine Weiterentwicklung der Lösungsalternative für das Unternehmen lohnenswert ist [HFW+12, S. 289].

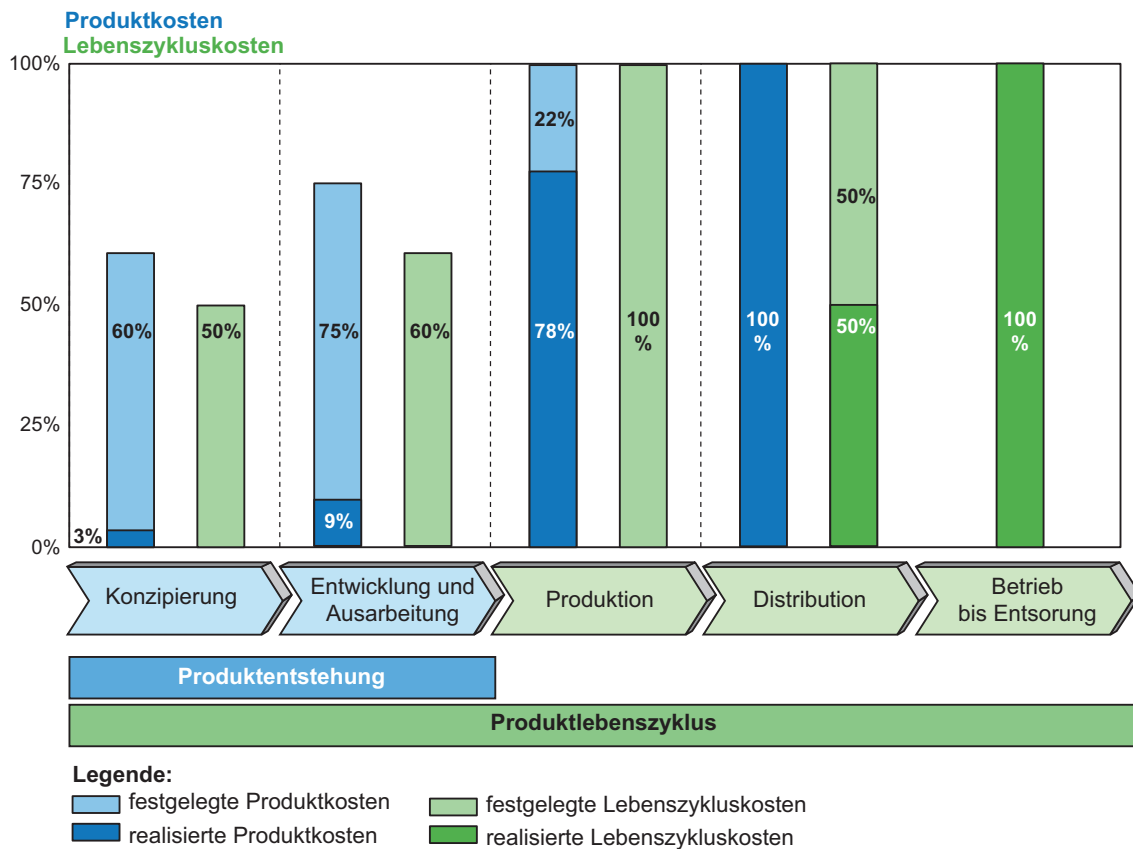
### 2.5.1 Beeinflussung der Wirtschaftlichkeit in der Entwicklung

Der Entwickler beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Systems über den Lebenszyklus maßgeblich [VDI2235, S. 3]. Die Kosten, die ein System bis zu seiner Distribution an den Kunden verursacht, werden zu 70 bis 80 Prozent im Rahmen der Entwicklung festgelegt (vgl. Bild 2-9). Der Anteil der in der Entwicklung festgelegten Lebenszykluskosten beträgt bis zu 50 Prozent [VDI2234, S. 5], [Bue09, S. 8], [DIN60300, S. 9].

In der Konzipierung werden die Rahmenbedingungen für die weitere Entwicklung mit Hilfe der Prinzipiellösung (vgl. Abschnitt 2.1.1) sowie bereits etwa 60 Prozent der Kosten festgelegt [Kol98, S. 62], [Bue09, S. 8]. Die eigentliche Kostenentstehung erfolgt hingegen erst in den späteren Lebenszyklusphasen [VDI2234, S. 5], [Bue09, S. 8]. Hier ergeben sich auch Möglichkeiten der Kosteneinsparung [HD97, S. 106]. Der größte Einfluss auf die Kosten ergibt sich somit in der Entwicklung, insbesondere in der frühen Phase [EB94, S. 351]. Die Berücksichtigung der Lebenszykluskosten im Rahmen der Konzipierung ist somit notwendig (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Der Nutzen eines Systems ergibt sich ebenfalls erst in späteren Phasen des Produktlebenszyklus, wird jedoch durch konstruktive Entscheidungen maßgeblich beeinflusst [Nie09, S. 228]. Nutzen resultiert aus der Befriedigung der Bedürfnisse der Kunden [Hom12, S. 497]. Zur Abschätzung des Geschäftserfolgs über den gesamten Produktle-

benszyklus hinweg, ist eine starke Fokussierung der Bedürfnisse eines Kunden erforderlich (Paradigma des *Product Life Time Value*<sup>35</sup>) [Nie09, S. 229]. Im Rahmen der Konzipierung kann dies durch Kundenorientierung (vgl. Abschnitt 2.5.3) erfolgen.



**Bild 2-9:** Festlegung und Entstehung der Kosten im Produktlebenszyklus (in Anlehnung an [VDI2234, S. 5], [Bue09, S. 8], [Nie09, S. 228], [Bla78, S. 15], [FB91, S. 13])

Nach WARNECKE ET AL. erfolgt im Rahmen der Entwicklung und Konstruktion die Wirtschaftlichkeitsrechnung in Form von Prinzip-Bewertungen, Herstellkostenvergleichen sowie dem Vergleich der Kosten über den gesamten Produktlebenszyklus [WBH+96, S. 13]. Darüber hinaus können die bewährten statischen und dynamischen Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung im Rahmen der Entwicklung und Konstruktion eingesetzt werden. Die Wahl des Verfahrens ist dabei abhängig von der zu beurteilenden Investition und stellt in erster Linie ein praktikables Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung für eine Lösungsalternative dar [VDI2234, S. 29f.], [WBH+96, S. 30f.]. Einen Überblick über einsetzbare Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung geben u.a. [Bro64] und

<sup>35</sup> Im Gegensatz zum Konzept des Customer Lifetime Value wird bei diesem Konzept nicht der Wert des Kunden über die Dauer der Geschäftsbeziehung (vgl. [HD97, S. 97]), sondern der Wert des Produkts über den Lebenszyklus für seine Stakeholder betrachtet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur Komplexitätsreduktion der Ansatz des Customer Lifetime Value nur indirekt über die Erfolgskette der Kundenorientierung (vgl. Abschnitt 2.5.3) berücksichtigt.

[WBH+96]. Die Bestimmung der Vorteilhaftigkeit basiert auf einer Reihe von Informationen, die im Rahmen der Entwicklung oftmals nur schwer zu quantifizieren sind [Sch86, S. 18], [VDI2234, S. 30]. Dies gilt neben der Abschätzung der Kosten auch für die erwarteten Erlöse sowie den Nutzen der Lösungsvariante [VDI2234, S. 30].

## 2.5.2 Lebenszykluskosten in der Entwicklung

Der zunehmende Kostendruck erfordert eine Integration der Kostenabschätzungen in die Entwicklungstätigkeiten [BHL07, S. 40]. Um den nachhaltigen Erfolg eines Intelligenten Technischen Systems über den gesamten Produktlebenszyklus zu ermitteln und so einen Vergleich alternativer Lösungen zu ermöglichen, bedarf es geeigneter Methoden zur Bewertung der Lebenszykluskosten dieser Systeme [Nie09, S. 226], [DAB+10, S. 123].

Die Lebenszykluskosten eines Systems setzen sich, wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, für das Unternehmen aus den Selbstkosten des Systems zusammen [VDI2884, S. 5]. Für den Kunden beginnt der Lebenszyklus des Systems mit dessen Kauf; für ihn entstehen neben den Anschaffungs-, auch Betriebs-, Instandhaltungs-/Wartungs- und Entsorgungskosten. Neben den Selbstkosten können für das Unternehmen Folgekosten im Produktlebenszyklus entstehen [DIN60300, S. 10]. Der Kunde sollte seine Entscheidung für ein System nicht ausschließlich auf Basis der Anschaffungskosten treffen (Kosteneisberg) [Bla78, S. 6], [Bla08, S. 420]. Für den Kunden sind die Anschaffungskosten für ein Produkt unmittelbar sichtbar. Die Kosten für Betrieb, Wartung, Instandhaltung und Entsorgung sind hingegen meist unsichtbar, machen jedoch den Hauptteil der Lebenszykluskosten aus [DIN60300, S. 8].

Eine lebenszyklusorientierte Betrachtung der Kosten ist vor dem Hintergrund von bspw. steigenden Entsorgungs- sowie Forschungs- und Entwicklungskosten für die Unternehmen und u.a. steigenden Energiekosten für den Kunden vermehrt durchzuführen. Es gilt, die Investitionen über den Lebenszyklus zu amortisieren [HD97, S. 96f.]. Erfahrungsgemäß werden bereits zum Ende der Konzeptphase über 50 Prozent der Lebenszykluskosten eines Systems festgelegt [DIN60300, S. 9]. Insbesondere bei komplexen Systemen kann der Entwickler hierbei leicht den Überblick über die zukünftig entstehenden Kosten verlieren [Ahm95, S. 261]. Um diese Kosten möglichst gering zu halten und die Leistungsfähigkeit sowie Attraktivität des Systems zu steigern, sollte eine Analyse der Lebenszykluskosten bereits in der frühen Phase der Entwicklung erfolgen. So lässt sich frühzeitig die Lösungsvariante auswählen, welche die geringsten Lebenszykluskosten verursacht. Es gilt zu beachten, dass zu diesem Zeitpunkt lediglich eine Abschätzung auf Basis von Modellen möglich ist; der Präzisionsgrad der Aussage steigt mit zunehmenden Detaillierungsgrad [SF06, S. 1420f.], [VDI2884, S. 4].

Für die Betrachtung der Lebenszykluskosten liefert die Literatur verschiedene Ansätze wie bspw. Lebenszykluskostenanalysen (vgl. u.a. [Dhi89, S. 29ff.], [Bla78, S. 35f.], [FB91, S. 29ff.]). Die Berücksichtigung der Kosten im Produktentstehungsprozess erfolgt

durch Ansätze wie die Wertanalyse oder das Target Costing (vgl. u.a. [DIN12973], [Sei93]).

Für die Bewertung der Lebenszykluskosten ist Expertise aus verschiedenen Disziplinen notwendig [Dhi89, S. 35]. Daher sollte sie von einem interdisziplinären Team aus den Bereichen des Unternehmens durchgeführt werden, die durch das System beeinflusst werden [Ahm95, S. 266], [VDI2807, S. 11]. In den meisten Fällen wird eine Lebenszykluskostenbewertung durch Experten aus dem Bereich Controlling durchgeführt. Diese besitzen jedoch wenig bis keine Erfahrung in der Entwicklung und sind häufig nicht in den Entwicklungsprozess integriert. Den Entwicklern hingegen fehlt es an der Erfahrung dieser Experten [SPJ+02, S. 543]. Eine Umfrage hat ergeben, dass für 50 Prozent der befragten Entwickler die Nachvollziehbarkeit der Kostenentstehung ihrer Produkte nur schwer bzw. überhaupt nicht gegeben ist [BHL07, S. 41]. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses ist es für die Entwickler jedoch wichtig zu verstehen wie Kosten entstehen, um so kosteneffiziente Lösungen zu finden. Dieses Verständnis ist somit bereits frühzeitig im Rahmen der Entwicklung durch ein geeignetes Vorgehen zu schaffen [SPJ+02, S. 543].

### 2.5.3 Kundenorientierung in der Produktentwicklung

Kundenorientierung bezeichnet die Ausrichtung der betrieblichen Leistungserstellungsprozesse an den Kundenbedürfnissen. Ziel ist es eine langfristig stabile und ökonomisch vorteilhafte Kundenbeziehung und somit Nutzen für den Kunden und das Unternehmen [Bru07, S. 13], [Küh91, S. 98f.]. Um als Nutzeninnovation am Markt erfolgreich zu sein, muss das Intelligente Technische System über einen besonderen Nutzen für die Kunden verfügen [KM05, S. 107]. Besonderer Nutzen kann in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus für den Kunden entstehen. Besonderer Nutzen lässt sich anhand der sechs Nutzen-Hebel nach KIM und MAUBORGNE oder durch Nutzenpotentiale nach PÜMPIN für das zu entwickelnde System identifizieren (vgl. Abschnitte 2.4 und 2.1.5). Kundenorientierung im Rahmen der Produktentwicklung kann somit einen Beitrag zur Reduktion von Misserfolgen der Produktinnovationen leisten, welche für Investitionsgüter bei 25 bis 40 Prozent liegen [Lüt07, S. 40ff.].

Nach HAMEL und PRAHALAD ist es jedoch nicht ausreichend sich lediglich an den artikulierten **Bedürfnissen** bedienter Kunden zu orientieren (vgl. Bild 2-10). Chancen für das Unternehmen bieten vielmehr die unartikulierten Bedürfnisse bedienter und nicht bedienter Kunden. Um als Unternehmen erfolgreich zu sein, ist es zudem nicht ausreichend lediglich heutige Bedürfnisse zu befriedigen. Einem erfolgreichen Unternehmen gelingt es, den Kunden dorthin zu führen, wohin dieser will, ohne, dass dem Kunden bekannt ist, dass er dorthin will [HP95, S. 161ff.]. Es sind neben den heutigen somit auch zukünftige Bedürfnisse zu antizipieren und zu befriedigen [GEK01, S. 75].

Es gilt zu beachten, dass die Entwickler ein Verständnis für den Kunden benötigen, so dass sich ihre Arbeit nicht nur auf die Einhaltung technischer Produktdaten beschränkt [DNL96, S. 103]. Die Eigenschaften eines Intelligenten Technischen Systems, respektive

sein Nutzen, sind in allen Lebenszyklusphasen durch konstruktive Einflüsse geprägt [Nie09, S. 225]. Kundenkontakt ermöglicht den Entwicklern, ihrerseits kundenorientierte Verbesserungen am Konzept vorzunehmen [DNL96, S. 103]. Die Systemeigenschaften werden frühzeitig in der Prinzipiösung festgelegt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die technisch bedingten Merkmale legen die Basiseigenschaften des Systems fest. Der Nutzen ergibt sich aber auch anhand organisatorischer Parameter, welche die Effektivität des Systems in seiner Umgebung beeinflussen. Bei der Auswahl einer alternativen Prinzipiösung sollte daher die Maximierung des Nutzens über den gesamten Lebenszyklus im Vordergrund stehen [Nie09, S. 225]. Auf diese Weise lassen sich kosten- und zeitintensive Iterationen in der späteren Produktentwicklung vermeiden [Lüt07, S. 40ff.], [Bri10, S. 2].

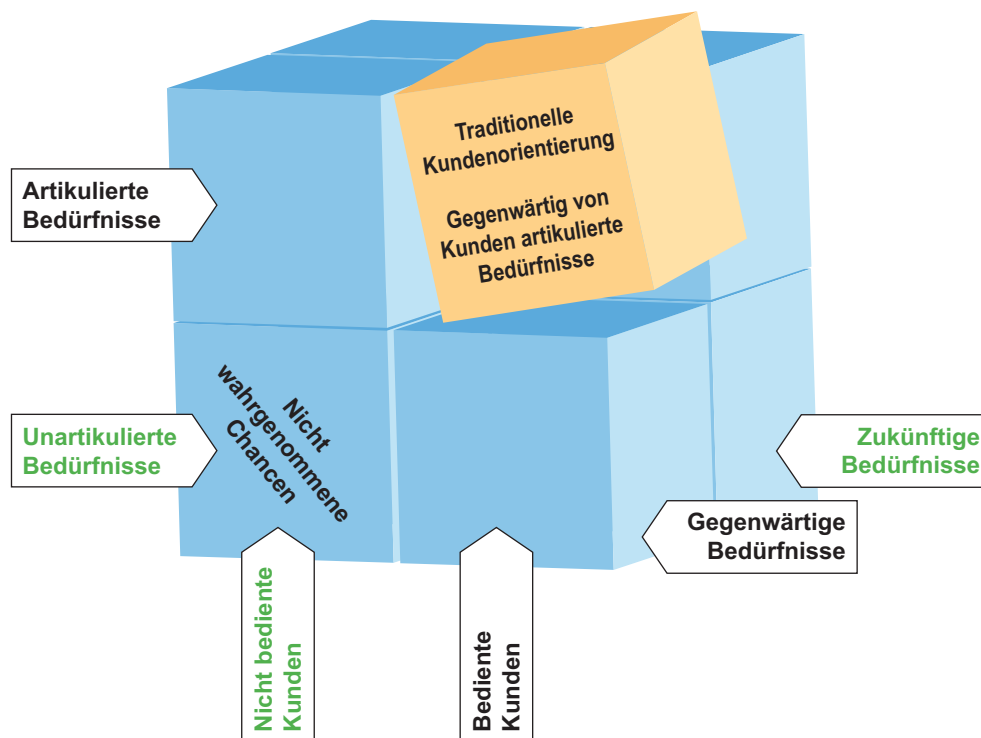


Bild 2-10: Umfassende Kundenorientierung in Anlehnung an HAMEL und PRAHALAD [HP95, S. 167], [GEK01, S. 75]

Die Auswirkungen der Kundenorientierung auf den Nutzen sowohl für den Kunden als auch für das Unternehmen wird in Bild 2-11 dargestellt; HESKETT ET AL. sprechen auch von der Erfolgskette der Kundenorientierung [HJL+94, S. 164ff.], [HSS97, S. 19]. Aus heutigen und zukünftigen Kundenbedürfnissen lassen sich nach KANO ET AL. Produktattribute ableiten [KST+84, S. 39ff.], [Bri10, S. 44]. Diese gilt es, in der Konzipierung durch die Prinzipiösung zu erschließen und somit Nutzen zu stiften. Der Kunde erwartet bereits vor dem Kauf eines Produkts einen gewissen Nutzwert für verschiedene Produktattribute. Hat er das Produkt erworben, findet ein Vergleichsprozess zwischen dem erwarteten und dem erlebten Nutzen des Systems statt. Ergebnis dieses Prozesses ist die **Kundenzufriedenheit**. Werden die Erwartungen des Kunden nicht erfüllt, entsteht

Unzufriedenheit. Werden sie erfüllt oder übertroffen, entsteht Zufriedenheit und Begeisterung beim Kunden [Hin09, S. 502], [HHM03, S. 14f.], [Woo97, S. 143]. Änderungen im Lebenszyklus des Systems bspw. durch eine Änderung der Betriebssituation, stoßen erneut einen Bewertungsprozess des erwarteten und erlebten Nutzens beim Kunden an [FWG97, S. 171f.]. Die Folge: Die Kundenzufriedenheit kann sich über den Lebenszyklus ändern. Aus diesem Grund ist es notwendig, den gesamten Lebenszyklus und die Veränderung des Nutzens über die Zeit zu berücksichtigen [SN94, S. 22].

Die zunehmende Kundenorientierung erfordert somit eine kontinuierliche Anpassung des Systems auf die jeweiligen Kundenbedürfnisse über den gesamten Lebenszyklus [DAB+10, S. 111]. Intelligente Technische Systeme haben die Eigenschaft, dass sie sich autonom an sich ändernde Umgebungsbedingungen und veränderte Kundenbedürfnisse anpassen können und somit dieser Anforderung gerecht werden (vgl. Abschnitt 2.3.2).

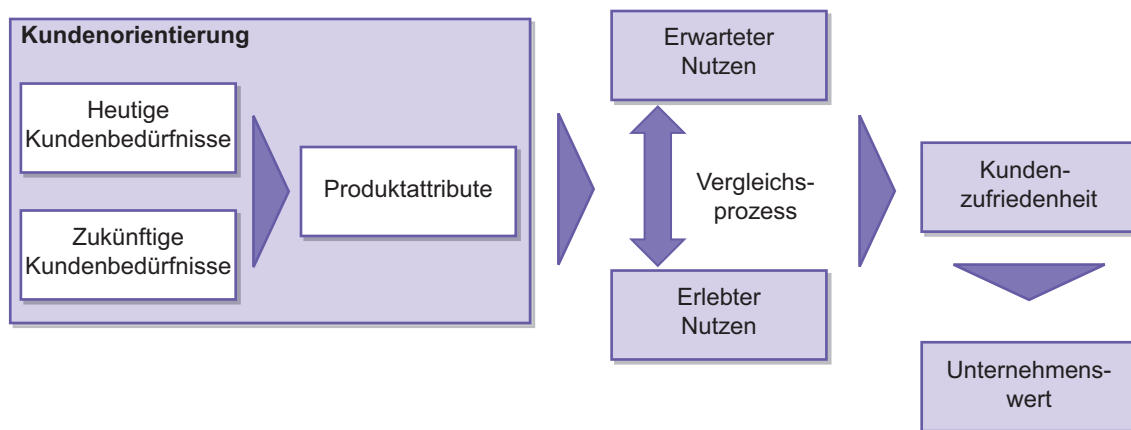


Bild 2-11: Erfolgskette der Kundenorientierung in Anlehnung an [HJL+94, S. 164ff.], [HSS97, S. 19], [KST+84, S. 39ff.], [MS00, S. 630]

Bei der Kundenorientierung in der Entwicklung gilt es zu beachten, dass der Nutzen innovativer Technologien nicht immer auch vom Kunden wahrgenommen wird. Wenn ein Technologievorteil gegeben ist, der Markt- bzw. Kundenvorteil jedoch nicht wahrgenommen wird, ist der nachhaltige Erfolg des Systems nicht gesichert [BJ12-ol, S. 4]. Aus diesem Grund ist es notwendig im Rahmen der Entwicklung zu überprüfen, ob neue Technologien ausreichend Nutzen für den Kunden stiften. Darüber hinaus ist zu beachten, dass bei der Bewertung des Nutzens die Gefahr besteht, dass eine Neuentwicklung durch das Management irrational überbewertet wird; diese aber das Kundenverhalten frühzeitig voraussagen müssen. Der Kunde auf der anderen Seite bewertet das gewohnte System über und lehnt das neue ab, obwohl es für ihn Nutzen stiften würde [Gou06, S. 47]. Die Nutzenbewertung bspw. im Rahmen einer Nutzwertanalyse ist also subjektiv und vom Bewertenden abhängig [Zan73, S. 50f.]. Eine frühzeitige Analyse und Bewertung des Nutzens eines Intelligenten Technischen Systems hat in Folge dessen im Rahmen der Systematik, einerseits das Management bei der subjektiven Bewertung methodisch zu unterstützen. Andererseits ist der Kundennutzen frühzeitig abzuschätzen und der Zusatznutzen herauszuarbeiten.



Durch Kundenorientierung im Rahmen der Entwicklung lässt sich die Zufriedenheit der Kunden steigern. Nach MATZLER und STAHL dient die Erzeugung von Kundenzufriedenheit der Steigerung des **Unternehmenswerts**<sup>36</sup>; also zur Steigerung des Unternehmensnutzens [MS00, S. 630], [BKR+07, S. 879]. Bei der wertorientierten Unternehmensführung stellt die Maximierung des Unternehmenswerts eine zentrale Zielgröße dar [HH98, S. 69], [MSH09, S. 5]. Entsprechende Maßnahmen zur Steigerung der Kundenzufriedenheit werden somit zunehmend als strategische Investition angesehen [MS00, S. 630], [BKR+07, S. 879]. In der vorliegenden Arbeit steht die Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme im Vordergrund, daher werden lediglich Maßnahmen berücksichtigt, welche in direktem Zusammenhang mit der Prinzipiellösung stehen.

#### 2.5.4 Analyse Intelligenter Technischer Systeme

Die im Rahmen der Arbeit angestrebte Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme soll die Entwickler bei der Entwicklung von Lösungsalternativen, deren Analyse und Bewertung auf Basis des wirtschaftlichen Prinzips unterstützen. Die Entwicklung von Systemen beruht im Allgemeinen auf Synthese-, Analyse<sup>37</sup>-, Bewertungs- und Selektionstätigkeiten [Kol98, S. 108]. Dieser Problemlösungszyklus hat seine Ursprünge in der Systemtechnik und wird im Systems Engineering<sup>38</sup> als Mikro-Logik in jeder Phase der Entwicklung angewendet [VDI2206, S. 27], [HFW+12, S. 73ff.], [BF11, S. 41ff.], [Dep01, S. 31]. Zusammengefasst handelt es sich um drei Phasen: Synthese, Analyse und Auswahl, die integrativ, iterativ sowie kontinuierlich in der Produktentwicklung durchgeführt werden [BF11, S. 41].

Ausgangspunkt für die **Synthese** ist das Ergebnis der Situationsanalyse sowie formulierte Ziele/Anforderungen, die das zu entwickelnde System zu erfüllen hat [HFW+12, S. 237], [VDI2206, S. 27].

---

<sup>36</sup> Traditionell wurden zur Unternehmenssteuerung die monetär messbaren Ziele Liquidität und Erfolg durch das Management fokussiert. Durch die zunehmende Komplexität im Unternehmensumfeld und Unternehmen sowie Unsicherheit über deren zukünftige Entwicklung gewinnt das Erfolgspotential eines Unternehmens zunehmend als Zielgröße für die strategische Planung an Bedeutung. Nach GÄLWEILER wird Erfolgspotential als optimaler Deckungsgrad der Stärken des Unternehmens und der Chancen im Umfeld verstanden. Diese Zielgröße lässt sich monetär als Unternehmenswert interpretieren, also als Barwert zukünftiger Erfolge oder Free Cashflows [CFG12, S. 8], [Gäl05, S. 26f.].

<sup>37</sup> Nach DUDEN bezeichnet Analyse eine Untersuchung bei der etwas in seine Bestandteile zerlegt wird [Dud13c-ol].

<sup>38</sup> Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz zur erfolgreichen Realisierung von Systemen, der in der Entwicklung den Produktlebenszyklus vom Konzept über die Produktion bis zum Betrieb berücksichtigt. Im Fokus stehen in der Konzeptphase die Definition der Kundenbedürfnisse sowie der geforderten Funktionalität des Systems und deren Dokumentation als Anforderungen. Auf Basis der Anforderungen werden Lösungsvarianten synthetisiert und validiert [Int04-ol], [KSW13, S. 7].

Es handelt sich um einen kreativen Prozess bei dem bekannte Lösungsmuster<sup>39</sup> und -elemente<sup>40</sup> neu kombiniert werden, um die Anforderungen an das System zu erfüllen. Hierbei werden top-down- und bottom-up-Aktivitäten kombiniert und bestehende sowie neu entwickelte Komponenten, Teile und Subsysteme in das Gesamtsystem integriert [BF11, S. 43], [Bla08, S. 96]. In dieser Phase erfolgt teilweise sogar unbewusst ein Wechselspiel aus Synthese- und Analysetätigkeiten [VDI2206, S. 27]. Die so entwickelten Lösungsvarianten können in der nächsten Phase detailliert analysiert werden [VDI2206, S. 28].

Die Systemanalyse bietet die Entscheidungsgrundlage für die **Auswahl** einer Erfolg versprechenden Lösungsvariante [BF11, S. 44], [KSW13, S. 100]. Als mögliche Bewertungsmethoden schlagen HABERFELLNER ET AL. bspw. die Nutzwertanalyse, die Kosten-Wirksamkeitsanalyse oder die Wirtschaftlichkeits- und Investitionsrechnung vor [HFW+12, S. 269ff.]. In dieser Phase werden die Lösungsvarianten dahingehend evaluiert, ob sie die gestellten Anforderungen erfüllen [Mac65, S. 1-6]. Die **Systemanalyse** liefert eine wissenschaftliche Methode, um komplexe Systeme zu untersuchen. Dabei wird versucht unterschiedliche Probleme durch dieselben Methoden zu lösen [Epp79, S. 36]. Für hoch komplexe Systeme, wie Intelligente Technische Systeme (vgl. Anhang A1), müssen Analyseverfahren gewählt werden, die neben den Elementeigenschaften auch die Beziehungen zwischen den Systemelementen erfassen [Fuc72, S. 82]. Die Eigenschaften der betrachteten Systeme übertreffen die Fähigkeiten ihrer einzelnen Systemelemente und sind im Zeitverlauf veränderlich [Has72a, S. 32]. Dies bedeutet für die Systemanalyse zum einen, dass bei der analytisch zergliedernden Betrachtung des Systems der Bezug zum Gesamtsystem gegeben sein muss. Zum anderen darf sich die Analyse von Wirkzusammenhängen nicht auf die strukturelle Betrachtung beschränken, vielmehr ist neben der strukturellen Beschreibung auch eine Betrachtung der Interaktion der Systemelemente im Zeitverlauf notwendig. Weiterhin können Aussagen über Elemente und Beziehungen komplexer Systeme häufig nicht nur durch eine Disziplin alleine getroffen werden. Es ist daher ein interdisziplinärer Ansatz zu wählen [Fuc72, S. 83f.]. Es ergeben sich vier elementare Grundschritte für die Analyse von komplexen Systemen: Analyse der Zielsetzung (Input-Output-Analyse des Systems), Analyse der Elemente (Anforderungserfüllung), Analyse der Beziehungen, Analyse des Systemverhaltens [Weg69, S. 73ff.], [Fuc72, S. 84ff.].

---

<sup>39</sup> Nach SUHM sind Lösungsmuster elementare Einheiten zur Entwicklung technischer Systeme [Suh93, S. 6f.]. Lösungsmuster im Kontext Intelligenter Technischer Systeme sind in Anlehnung an ALEXANDER ET AL. in der Umwelt auftretende Probleme sowie die Beschreibung ihrer Lösung, so dass diese Lösung in anderen Kontexten erneut eingesetzt werden kann [Dum11, S. 38f.], [AIS+95, S. 12].

<sup>40</sup> Ein Lösungselement stellt eine existierende und bewährte Lösung zur Erfüllung einer Funktion dar. Es handelt sich meist um ein Modul/eine Baugruppe, das/die auf einem Wirkprinzip beruhen/beruht [GEK01, S. 36]. Ein Wirkprinzip bezeichnet nach PAHL/BEITZ den Zusammenhang von physikalischem Effekt und stofflichen sowie geometrischen Eigenschaften (Wirkgeometrie, Wirkbewegung, Werkstoff). Durch das Wirkprinzip wird das Prinzip der Lösung zur Erfüllung einer Teilfunktion erkennbar [PBF+07, S. 54].

DAMM ET AL. bewertet für Cyber-Physical Systems, als Teil der Intelligenten Technischen Systeme, die adäquate Berücksichtigung des relevanten technischen Rahmens des Systems sowie die Gesamtheit der relevanten Wechselwirkungen ebenfalls als notwendig. Wesentliche Aufgabe der Systemanalyse ist für DAMM ET AL. die Entwicklung der Systemarchitektur, die sowohl eine Balance zwischen Nutzenerwartungen, Anforderungen aus funktionaler, technischer und administrativer Sicht als auch die Einhaltung der Randbedingungen (Ökologie, Ökonomie, Sicherheitsstandards etc.) bspw. durch den Einsatz von Modellen gewährleistet [DAB+10, S. 107]. Bei der Systemanalyse handelt es sich um eine Erkenntnismethode, die alle Verfahren und Systematiken umfasst, die für eine wirtschaftliche Realisierung von Systemen unter Beachtung unternehmensindividueller Zielsetzungen Einsatz findet [Kor72, S. 11]. Dabei erfolgt keine isolierte Betrachtung der Einzelfaktoren des Systems, sondern vielmehr eine Analyse ihrer Bedeutung und Einordnung im Gesamtsystem [Epp79, S. 36]. Voraussetzung für die Analyse eines Systems ist dessen geeignete Beschreibung [Har67, S. 22ff.]. Vor dem Hintergrund stetig wachsender Systemumfänge kommt einer automatisierten oder teilautomatisierten Analyse auf Basis von Modellen dabei besondere Bedeutung zu [DAB+10, S. 108]. Hierbei gilt, dass in Abhängigkeit des Detaillierungsgrads des Systemkonzepts und dem damit einhergehenden vollständigen Systemverständnis, weitere detailliertere Analysen möglich sind [Har67, S. 252f.].

### 2.5.5 Modelle in der Entwicklung

Abschnitt 2.5.4 hat gezeigt, dass die Analyse Intelligenter Technischer Systeme aufgrund ihrer Komplexität auf Basis von Modellen zu erfolgen hat. Die im Rahmen der Arbeit zu entwickelnde Systematik soll daher die Bewertung und Abbildung der Wirtschaftlichkeit anhand eines parametrischen und graphischen Modells ermöglichen.

Die Modellbildung ist ein wesentliches Prinzip des Systemdenkens<sup>41</sup> zur Abbildung komplexer Systemzusammenhänge. Modelle bilden eine Abstraktion und Vereinfachung der Realität ab. Sie zeigen somit lediglich Aspekte des betrachteten Systems. Es ist notwendig die Modelle dahingehend zu prüfen, ob sie hinsichtlich der Situation und Problemstellung genügend aussagefähig sind [HFW+12, S. 41]. Nach PATZAK haben Modelle daher die folgenden Anforderungen zu erfüllen: Ein Modell muss *empirisch richtig* sein, d.h. eine entsprechenden Übereinstimmung mit der Realität besitzen. Es muss *formal richtig* sein, also widerspruchsfrei und formal einwandfrei. Ein Modell sollte dem Modellierungszweck entsprechen, also *produktiv* sein. Zudem sollte es *handhabbar* und seine Erstellung, Anwendung und Pflege *nicht aufwendig* sein. Die Anforderungen sind konfliktär.

---

<sup>41</sup> Beim Systemdenken (*engl. systems thinking*) wird der Ansatz einer ganzheitlichen Betrachtungsweise, wie sie für Systeme notwendig ist, auf das Denken übertragen, um die Gedanken zu ordnen [Che81, S. 4].

Es gilt also, einen Kompromiss zu schließen [Pat82, S. 309]. Hierbei unterstützt ein pragmatischer Ansatz bei der Erstellung von Modellen unter den Fragestellungen *für wen*, *wann* und *wozu* das Modell gebildet wird [Sta73, S. 196], [Kai14, S. 8].

Die durchgängige Beschreibung und Analyse von Systemen im Rahmen der Entwicklung erfolgt zunehmend modellbasiert. Es wird auch von modellbasiertem Systementwurf oder Model-Based System Design gesprochen. Modelle im Rahmen des Systementwurfs sind bspw. Anforderungsmodelle, Verhaltensmodelle oder CAD-Modelle [VDI2206, S. 46]. Kosten werden bspw. mit Hilfe von Kostengliederungsstrukturen (Cost Breakdown Structures) [Bla78, S. 192 u. S. 32f.] abgebildet. Ein Beispiel für die Abbildung von Nutzen ist das Modell der Kundenzufriedenheit nach KANO ET AL. (vgl. Abschnitt 2.5.3) [KST+84, S. 39ff.]. Jede Fachdisziplin verfügt über eigene Modelle zur Abbildung des zu entwickelnden Systems [VDI2206, S. 46].

Im Model-Based Systems Engineering finden formalisierte Modelle in der Entwicklung zur Unterstützung der Anforderungsdefinition, des Designs sowie zur Analyse, Verifikation und Validierung durchgängig Anwendung [Int07, S. 15f.]. Hierbei steht das Systemdenken im Vordergrund. Mit Hilfe eines Systemmodells wird das zu entwickelnde System so beschrieben, dass es für alle beteiligten Fachdisziplinen verständlich ist [Kai14, S. 24]. KAISER liefert ein Rahmenwerk zur Modellierung des Systemmodells für mechatronische Systeme, welches auch auf Intelligente Technische Systeme angewendet werden kann [Kai14, 73ff.].

Modelle werden durch Modellierungssprachen beschrieben. Als Beispiel für eine etablierte Modellierungssprache sei hier die SysML (Systems Modeling Language) genannt. Sie wurde von der OMG (Object Management Group) und der INCOSE basierend auf der UML 2.1 (Unified Modeling Language) entwickelt, welche aus der Softwaretechnik stammt [Wei06, S. 21f.].

Zur interdisziplinären Beschreibung des zu entwickelnden Systems lassen sich konzeptuelle Modelle einsetzen. Ein konzeptuelles Modell ist ein Modell, welches ein abstrahiertes Abbild der Realität mittels einer konzeptuellen Modellierungssprache beschreibt. Die konzeptuelle Modellierungssprache wird durch eine abstrakte Syntax, die Semantik der Modellkonstrukte sowie die konkrete Syntax definiert. Die konkrete Syntax beinhaltet Anordnungsregeln der Modellkonstrukte sowie ihre konkrete Repräsentation in Form einer graphischen Notation. Die abstrakten Konstrukte einer Modellierungssprache, Regeln zu deren Kombination sowie zur *Wohlgeformtheit der Sprache* werden durch die abstrakte Syntax definiert. Die Bedeutung der Konstrukte sowie die durch ihre Kombination gebildeten Ausdrücke werden durch die Semantik festgelegt [Poh07, S. 279 u. S. 667 u. S. 702ff.]. Je nach Formalisierungsgrad der Syntax und Semantik der Modellierungssprache wird zwischen formalen, semiformalen und informalen Sprachen unterschieden. Zur Beschreibung des Systemmodells wird bspw. eine semiformale Modellierungssprache bevorzugt, da diese die Kreativität der Entwickler nicht hemmt. Darüber hinaus ist die

Akzeptanz bei den Anwendern höher, da keine Barrieren für die freie und flexible Modellierung geschaffen werden, wie es bei formalen Sprachen der Fall ist [Kai14, S. 35].

Nichtsdestotrotz ist sicherzustellen, dass das Modell die relevanten Aspekte der Realität abbildet und so modelliert ist, dass es von allen an der Entwicklung beteiligten Disziplinen gleichermaßen verstanden wird. Hierbei werden die Modellersteller durch die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung nach BECKER ET AL. unterstützt: Grundsatz der Richtigkeit, Grundsatz der Relevanz, Grundsatz der Wirtschaftlichkeit, Grundsatz der Klarheit, Grundsatz der Vergleichbarkeit und Grundsatz des systematischen Aufbaus. Diese lehnen sich an die Grundsätze ordnungsmäßiger Buchführung an [BPV12, S. 32]. KAISER definiert in Anlehnung an diese Grundsätze drei Anforderungen an ein plausibles Modell, welches mit einer semiformalen Modellierungssprache beschrieben wird [Kai14, S. 43f.]:

- **Vergleichbarkeit:** Durch die Definition der abzubildenden Elemente und Beziehungen des Modells ist sicherzustellen, dass dieses von allen Fachdisziplinen gelesen und vergleichbar interpretiert werden kann.
- **Vollständigkeit:** Es sind Annahmen zu treffen, die eine Aussage über die Vollständigkeit des Modells ermöglichen.
- **Richtigkeit:** Diese Anforderung zielt auf die Syntax und Semantik des Modells ab. Die Überprüfung der Syntax ist durch Bedingungen, als Teil der Definition der Elemente und Beziehungen, im Modell zu ermöglichen. Die Richtigkeit der Semantik des Modells ist abhängig vom Kontext. Der Modellersteller ist bei der Bewertung der Syntax durch Hilfsmittel geeignet zu unterstützen.

## 2.5.6 Entwicklungsmethodik für Intelligente Technische Systeme

Für die Entwicklung Intelligenter Technischer Systeme bedarf es eines interdisziplinären Ansatzes, da an ihrer Entwicklung neben den Fachdisziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik auch Experten aus den Bereichen der höheren Mathematik und der künstlichen Intelligenz beteiligt sind [DGI+14, S. 4f.]. Die Entwicklungsmethodik für Intelligente Technische Systeme liefert einen interdisziplinären Ansatz zur Entwicklung dieser Systeme. Das Vorgehen gliedert sich, wie in Bild 2-12 gezeigt, auf der obersten Ebene in die Phasen *disziplinübergreifende Konzipierung* und *disziplinspezifischen Entwurf und Ausarbeitung* [GFD+09, S. 201ff.], [GV14a, S. 66f.], [GV14c, S. 25ff.].

Die Konzipierung bildet im Produktentstehungsprozess die Schnittstelle zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 2.1.1). Da die Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme dieser Phase zuzuordnen ist, wird auf diese im Folgenden detaillierter eingegangen. Für eine Beschreibung des disziplinspezifischen Entwurfs und der Ausarbeitung sei

auf [KPS+14, S. 74ff.] verwiesen. Das Vorgehen wird durch verschiedene Methoden unterstützt, die unter anderem selbstoptimierungsspezifisch sind (vgl. [ADG+09], [DHK+09], [GRS14], [GRS+14]).

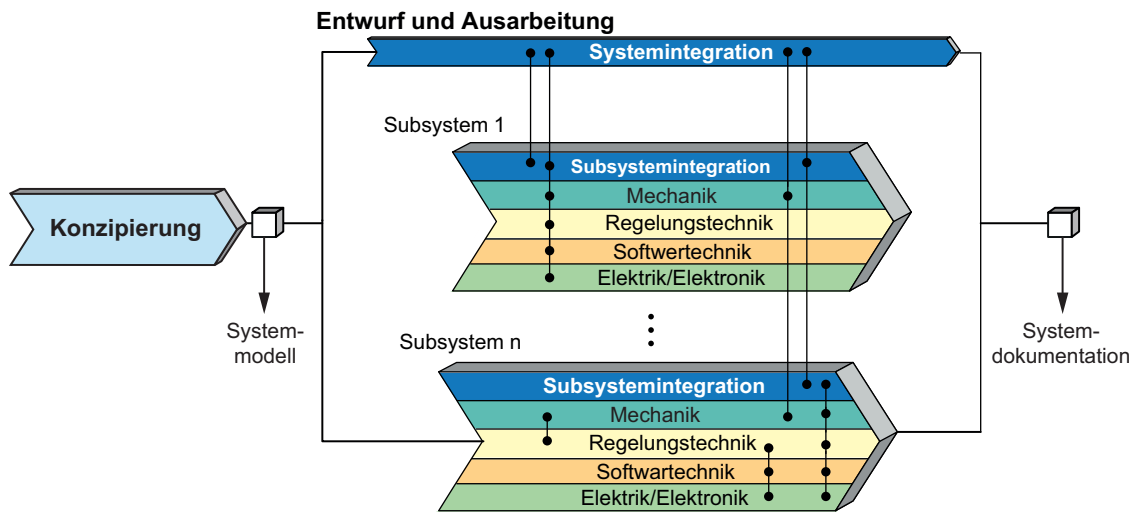


Bild 2-12: Entwicklungsmethodik für Intelligente Technische Systeme [GSD+09, S. 266], [GV14a, S. 67]

### Spezifikationstechnik CONSENS

Ziel der Konzipierung ist die Entwicklung der Prinzipiellösung des zu entwickelnden Intelligenten Technischen Systems. Die Konzipierung wird durch die Spezifikationstechnik CONSENS (**CON**ceptual design **SP**ecification technique for the **EN**gineering of complex **S**ystems) zur Beschreibung der Prinzipiellösung unterstützt [Fra06, S. 79ff.], [GZD+08, S. 1278ff.], [GFD+09, S. 201ff.]. Sie bilden die Basis für die Kommunikation und Kooperation der Entwickler über den gesamten Entwicklungsprozess [GTV14, S. 806]. Die Beschreibung der Prinzipiellösung ist in Aspekte gegliedert. Die rechnerinterne Repräsentation der Aspekte wird als Partialmodell bezeichnet. Wie Bild 2-13 zeigt, umfasst die Prinzipiellösung die acht Aspekte Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt, Verhalten und Zielsystem. Die Aspekte stehen zueinander in Beziehung und sollen ein konsistentes Ganzes ergeben. Die Prinzipiellösung wird daher als kohärentes System von Partialmodellen abgebildet. Die Aspekte und respektive die Partialmodelle sind im Wechselspiel zu entwickeln, wenngleich es eine gewisse Reihenfolge gibt, welche durch den Konzipierungsprozess vorgegeben wird [ADG+09, S. 156f.]. Die Abbildung der Partialmodelle wird durch das dedizierte Softwarewerkzeug Mechatronic Modeller unterstützt [GLL12, S. 107ff.].

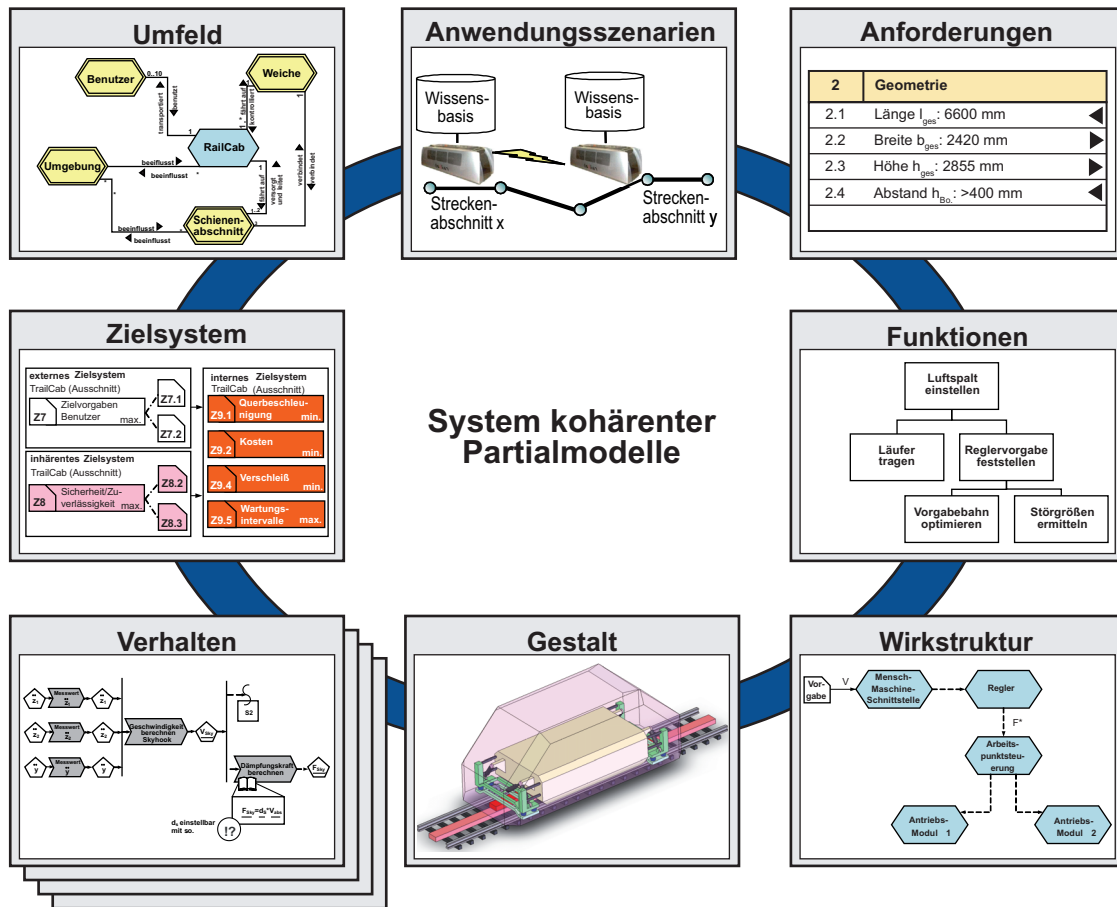


Bild 2-13: Partialmodelle zur Beschreibung der Prinziplösung [Fra06, S. 80], [ADG+09, S. 157]

## Disziplinübergreifende Konzipierung

Der Konzipierungsprozess gliedert sich wie in Bild 2-14 dargestellt in die vier Phasen: Planen und Klären der Aufgabe, Konzipierung des Gesamtsystems, Konzipierung der Subsysteme und Konzeptintegration. Ziel ist die Prinziplösung des zu entwickelnden Intelligenzen Technischen Systems, welche die zuvor vorgestellten Aspekte umfasst.

In der ersten Phase **Planen und Klären der Aufgabe** wird zunächst die Aufgabenstellung abstrahiert und analysiert, um den Kern der Entwicklungsaufgabe zu identifizieren. Hierzu wird das System zunächst als Blackbox betrachtet und im *Umfeldmodell* die Systemgrenze festgelegt. Zudem bildet das Modell die Interaktion des Systems mit den Elementen in seinem Umfeld ab. *Anwendungsszenarien* beschreiben verschiedene Situationen in denen sich das System befinden kann sowie das gewünschte Verhalten. Durch Anwendungsszenarien lassen sich die *externen Ziele* des Systems identifizieren. Abschließend werden *Anforderungen* an das zu entwickelnde System abgeleitet [GFD+09, S. 217f.], [ADG+09, S. 157ff.], [GV14b, S. 70ff.].

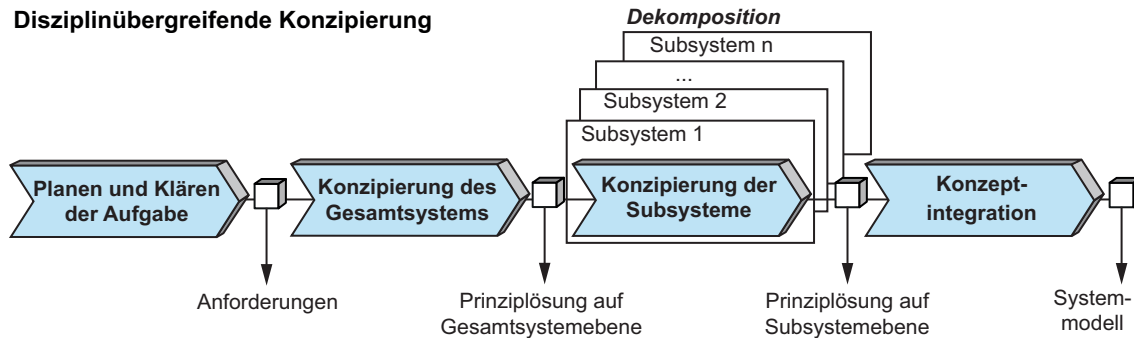


Bild 2-14: Vorgehen bei der Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme [ADG+09, S. 167]

In der zweiten Phase **Konzipierung auf Systemebene** werden prinzipielle Lösungsvarianten erarbeitet. Auf Basis der Anforderungen werden hierzu *Funktionen* abgeleitet und als Funktionshierarchie abgebildet. Für die Teilfunktionen der Funktionshierarchie werden Lösungsmuster bzw. -elemente identifiziert. Durch Kombination der Teillösungen im morphologischen Kasten werden Lösungsvarianten entwickelt. Die Lösungsvarianten werden bewertet und für die weitere Betrachtung ausgewählt. Dieser Auswahlprozess soll durch die Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung unterstützt werden. Für die ausgewählten Lösungsvarianten werden die Teillösungen in der *Wirkstruktur* durch Informations-, Stoff-, und Energiebeziehungen verknüpft. Die Wirkstruktur beschreibt den grundsätzlichen Aufbau des Systems sowie dessen prinzipielle Wirkungsweise. Gestaltbehaftete Elemente der Wirkstruktur werden im Partialmodell *Gestalt* abgebildet. Zur Beschreibung des Systemverhaltens werden im Partialmodell *Verhalten* drei Arten von Modellen eingesetzt: Aktivitätsdiagramme, State Charts sowie Sequenzdiagramme [GFD+09, S. 218], [ADG+09, S. 168ff.]. Für die entwickelte Lösung werden im nächsten Schritt in Anlehnung an POOK in Konflikt stehende Ziele des Systems identifiziert [Poo11, S. 81ff.]. Diese können entweder durch einen Kompromiss oder durch die Integration von kognitiven Funktionen und die Integration von Lösungsmustern der Selbstoptimierung nach DUMITRESCU gelöst werden [Dum11, S. 98ff.]. Wird der Einsatz von Selbstoptimierung gewählt, werden diese Ziele im Partialmodell *Zielsystem* abgebildet und die anderen Aspekte entsprechend ergänzt. Im letzten Schritt erfolgt die Modularisierung des Systems in Subsysteme in Anlehnung an STEFFEN [Ste07, S. 88ff.] sowie eine abschließende Bewertung der Lösung. Auch dieser Bewertungsschritt soll durch die zu entwickelnde Systematik unterstützt werden. Ergebnis der Phase ist die Prinziplösung auf Systemebene [GV14b, S. 70ff.].

Die **Konzipierung auf Subsystemebene** erfolgt für die Subsysteme gemäß der Vorgehensweise zur vorangegangenen Konzipierung auf Gesamtsystemebene. Ergebnis dieser Phase ist die Prinziplösung für die einzelnen Subsysteme [GFD+09, S. 216], [ADG+09, S. 168].



In der letzten Phase der **Konzeptintegration** werden die Prinziplösungen auf Gesamt- und Subsystemebene integriert. Es erfolgt eine abschließende Analyse des Systems hinsichtlich Verlässlichkeit, System Dynamik und Wirtschaftlichkeit. Der Analyseprozess soll durch die Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung ebenfalls unterstützt werden. Ergebnis der Phase ist das Systemmodell. Dieses dient als Grundlage für die nachfolgende Konkretisierung in den einzelnen Disziplinen Mechanik, Elektronik/ Elektrik, Regelungstechnik sowie Softwaretechnik [GV14b, S. 73f.].

## 2.6 Herausforderungen bei der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung

Der Innovationssprung von mechatronischen hin zu Intelligenten Technischen Systemen ermöglicht Systeme, die in der Lage sind, sich kontinuierlich an sich ändernde Umfeld- und Kundenanforderungen anzupassen (vgl. Abschnitt 2.2). Intelligente Technische Systeme lassen sich durch die Integration von Selbstoptimierung realisieren (vgl. Abschnitt 2.3). Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend sowie benutzungsfreundlich und weisen somit ein **hohes Nutzen- sowie Kosteneinsparungspotential** auf. Diese Potentiale zeigen sich insbesondere in ihrer Betriebsphase. Intelligente Technische Systeme bieten somit die Möglichkeit einer Nutzeninnovation (vgl. Abschnitt 2.4). Im Rahmen der strategischen Produktplanung werden die Nutzenpotentiale identifiziert und im Rahmen der Produktentwicklung in eine technische Lösung überführt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die Schnittstelle zwischen beiden Phasen bildet die Konzipierung, deren Ergebnis die prinzipielle Lösung darstellt. Der Konzipierungsprozess sowie die Entwicklung von technischen Systemen sind durch eine hohe Interdisziplinarität geprägt. Aus diesem Grund erfolgt die Entwicklung zunehmend modellbasiert (vgl. Abschnitt 2.5.5). Die Prinziplösung legt bereits bis zu 60 Prozent der Kosten des Systems fest und beschreibt, wie die Nutzenpotentiale durch die Lösung gehoben und somit die Kundenbedürfnisse befriedigt werden. In der Konzipierung wird also der Grundstein für die Wirtschaftlichkeit des Intelligenten Technischen Systems über den Produktlebenszyklus gelegt (vgl. Abschnitt 2.5.1). Bei der Konzipierung nach dem Prinzip der Wirtschaftlichkeit ergeben sich die folgenden Herausforderungen:

- **Interdisziplinarität:** An der Entwicklung Intelligenter Technischer Systeme sind die Disziplinen Mechanik, Regelungstechnik, Elektronik/Elektrik sowie Experten aus der höheren Mathematik und der künstlichen Intelligenz beteiligt [DGI+14, S. 4f.]. Es ist notwendig neben der technischen Expertise dieser Disziplinen auch Experten hinzuzuziehen, die einen Überblick über das Gesamtsystem sowie den Produktlebenszyklus besitzen [BF11, S. 45]. Der Konzipierungsprozess sowie die Entwicklung von technischen Systemen sind durch eine hohe Interdisziplinarität geprägt. Vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit ist die Integration der Marketing- und Vertriebsabteilungen sowie des Rechnungswesens ratsam, um so den unmittelbaren und schnellen Austausch der häufig divergierenden Vorstellungen zu ermöglichen [HHB09, S. 82f.].

- **Einheitliches Verständnis:** Die beteiligten Disziplinen haben spezifische Modelle und Dokumente, welche ihre Sicht auf das zu entwickelnde System abbilden (vgl. Abschnitt 2.5.5). Es gilt, ein ganzheitliches Systemverständnis zu erzeugen, welches sich nicht nur auf das technische System bezieht, sondern auch die Entstehung von Kosten und Nutzen über dessen Lebenszyklus umfasst. Das Systemmodell ist somit um den Aspekt Wirtschaftlichkeit zu ergänzen.
- **Abhängigkeiten von Kosten, Nutzen und Wirtschaftlichkeit:** Die Erfolgskette der Kundenorientierung (vgl. Abschnitt 2.5.3) zeigt, dass der Nutzen der Stakeholder nicht unabhängig voneinander betrachtet werden kann. Auch Kosten bedingen sich untereinander, so setzen sich bspw. die Lebenszykluskosten aus den Anschaffungs-, Betriebskosten usw. zusammen (vgl. Abschnitt 2.1.4). Auch Kosten und Nutzen lassen sich nicht unabhängig voneinander betrachten, so ergibt sich die Wirtschaftlichkeit des Systems aus dem Verhältnis von Nutzen zu Kosten (vgl. Abschnitt 2.1.3) oder die Anschaffungskosten für das System setzen sich aus dem Zielgewinn und den Selbstkosten zusammen (vgl. Abschnitt 2.1.4, Bild 2-2). Dabei stellt der Zielgewinn einen Nutzen für das Unternehmen dar (vgl. Abschnitt 2.1.5, Bild 2-3). Diese Beziehungen zwischen Kosten, Nutzen und der Wirtschaftlichkeit des Intelligenten Technischen Systems sind entsprechend im Wirtschaftlichkeitsmodell abzubilden.
- **Plausibilität:** Für ein Modell, welches die Wirtschaftlichkeit des Intelligenten Technischen Systems abbildet, sollte ein konzeptuelles semiformales Modell eingesetzt werden, da dieses die Kreativität der Anwender nicht einschränkt und über eine höhere Akzeptanz verfügt. Es gilt jedoch sicherzustellen, dass die relevanten Aspekte der Realität so abgebildet und modelliert werden, dass sie von allen Disziplinen verstanden werden. Ein plausibles Wirtschaftlichkeitsmodell hat somit die Anforderungen an Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Richtigkeit nach KAISER zu erfüllen (vgl. Abschnitt 2.5.5) [Kai14, S. 43f.].

Im Allgemeinen besteht die Produktentwicklung aus einem Problemlösungszyklus, welcher in allen Phasen kontinuierlich durchgeführt wird. Er umfasst die drei Phasen: Synthese, Analyse und Auswahl (vgl. Abschnitt 2.5.4). Um die Entwicklung wirtschaftlicher Lösungsvarianten zu ermöglichen, sind die drei Phasen über den gesamten Konzipierungsprozess methodisch zu unterstützen. Hierbei ergeben sich die folgenden Herausforderungen:

- **Analyse und Bewertung der Lebenszykluskosten:** Eine wirtschaftlichkeitsorientierte Konzipierung hat die Identifikation und Analyse von Kosten, welche das Intelligente Technische System über den Lebenszyklus verursacht, zu umfassen (vgl. Abschnitte 2.1.4 und 2.5.2). Die identifizierten Kosten sind entsprechend im Wirtschaftlichkeitsmodell für die relevanten Stakeholder wie den Kunden oder das Unternehmen abzubilden. Darüber hinaus bedarf es geeigneter Analyse- und Bewertungsme-

thoden der Kostenelemente für die frühe Phase. Im Rahmen der Konzipierung ist sicherzustellen, dass der im Geschäftsplan festgelegte Zielpreis und die daraus resultierenden Zielkosten durch die Lösung eingehalten werden (vgl. Abschnitt 2.1.1).

- **Analyse und Bewertung des Nutzens:** Im Rahmen der strategischen Produktplanung werden Nutzenpotentiale sowie heutige und zukünftige Kundenbedürfnisse identifiziert. Sie beschreiben den Zusatznutzen im Sinne einer Nutzeninnovation (vgl. Abschnitt 2.4). Im Rahmen der Konzipierung ist sicherzustellen, dass die Prinzipiellösung diesen besonderen Nutzen für die Stakeholder entsprechend realisiert (vgl. Abschnitt 2.1.5, Bild 2-3). Der Nutzen ist somit im Wirtschaftlichkeitsmodell abzubilden. Die Nutzenelemente sind sowohl hinsichtlich der Erwartungen des Kunden als auch der Umsetzung durch die Prinzipiellösung zu analysieren und zu bewerten (vgl. Abschnitt 2.5.3).
- **Systemverhalten:** Intelligente Technische Systeme sind hoch dynamisch und komplex (vgl. Anhang A1). Sie sind in der Lage ihr Verhalten im Betrieb selbstständig an ihre Umgebung anzupassen. Es ist daher bei der Analyse dieser Systeme nicht ausreichend, lediglich die einzelnen Elemente des Systems zu betrachten, vielmehr sind nach FUCHS-WEGENER auch deren Beziehungen und ihr Verhalten im Zeitverlauf zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.5.4). Gleiches gilt für die Kosten und den Nutzen dieser Systeme, welche sich nicht nur einzelnen Elementen des Systems zuordnen lassen, sondern auch durch das Systemverhalten bedingt werden (vgl. Abschnitte 2.5.2 und 2.5.3). Die Analyse hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Konzipierung hat demnach auch für die Kosten und den Nutzen im Lebenszyklus das Systemverhalten zu berücksichtigen.
- **Entscheidungsgrundlage:** Basierend auf den Ergebnissen der Analyse und Bewertung der Prinzipiellösung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gilt es zu entscheiden, ob eine Weiterentwicklung der Lösungsalternative für das Unternehmen lohnenswert ist [HFW+12, S. 289]. Das Wirtschaftlichkeitsmodell soll daher eine Entscheidungsgrundlage für das Management liefern. Auf dieser Grundlage soll entschieden werden, ob die ausgewählte Lösung im disziplinspezifischen Entwurf und Ausarbeitung weiterentwickelt wird.
- **Entwicklungsrahmen:** Für die weitere Entwicklung liefert die Prinzipiellösung die technischen Rahmenbedingungen. Das Wirtschaftlichkeitsmodell und die Ergebnisse der Analyse und Bewertung sollen entsprechend einen Rahmen für die weitere wirtschaftliche, disziplinspezifische Entwicklung liefern.

## **2.7 Anforderungen an die Systematik zur frühzeitigen Wirtschaftlichkeitsanalyse Intelligenter Technischer Systeme**

Um den in Abschnitt 2.6 zusammengefassten Herausforderungen bei der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme zu begegnen, hat die zu entwickelnde Systematik die folgenden Anforderungen<sup>42</sup> zu erfüllen. Diese werden aus den vorangegangenen Abschnitten 2.1 bis 2.6 abgeleitet.

### **2.7.1 Übergeordnete Anforderungen**

Nachfolgend werden übergeordnete Anforderungen dargestellt, welche die gesamte Systematik betreffen:

#### **A1: Integraler Bestandteil der Konzipierung**

Die Konzipierung besteht in jeder Phase aus einem Wechselspiel von Synthese-, Analyse- und Auswahl Tätigkeiten [VDI2206, S. 27]. Um die Entwicklung einer wirtschaftlichen Lösungsvariante zu ermöglichen, sind diese Tätigkeiten durch die zu entwickelnde Systematik unter der Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit entsprechend zu unterstützen. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Lösung die Nutzenpotentiale erschließt und die vorgegebenen Zielkosten einhält. Da der Konzipierungsprozess eine allgemeingültige Anwendbarkeit besitzt, ist für die zu entwickelnde Systematik ebenfalls die Allgemeingültigkeit sicherzustellen.

#### **A2: Entscheidungsgrundlage**

Im Rahmen der Konzipierung stehen die Entwickler sowie das Management vor der Entscheidung, ob die Prinzipiellösung bzw. welche Lösungsalternative für die Weiterentwicklung durch das Unternehmen lohnenswert ist. Diese Entscheidung ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu treffen. Die zu entwickelnde Systematik soll daher eine Entscheidungsgrundlage für die Entwickler und das Management liefern, ob und wenn, welche Lösungsvariante ausgewählt und weiterbetrachtet wird.

#### **A3: Rahmen für die wirtschaftliche, disziplinspezifische Entwicklung**

Für die weitere Entwicklung des Intelligenen Technischen Systems in den Fachdisziplinen liefert die Prinzipiellösung die technischen Rahmenbedingungen. Dementsprechend soll die wirtschaftlichkeitsorientierte Konzipierung neben den technischen auch wirtschaftliche Vorgaben für die Entwicklung in den Fachdisziplinen liefern.

---

<sup>42</sup> Eine erste Ermittlung von Anforderungen an die Bewertung von Kosten und Nutzen selbstoptimierender Systeme erfolgte bereits in [VG12].

### **2.7.2 Anforderungen an das Wirtschaftlichkeitsmodell**

Nachfolgend werden die Anforderungen dargestellt, welche sich auf die Abbildung der Wirtschaftlichkeit im Wirtschaftlichkeitsmodell beziehen:

#### **A4: Einheitliches Verständnis der Wirtschaftlichkeit**

Im Rahmen der Konzipierung ist neben dem einheitlichen Verständnis des technischen Systems auch ein einheitliches Verständnis für die Entstehung von Kosten und Nutzen des Systems im Lebenszyklus zu ermöglichen. Hierzu ist das Systemmodell in CONSENS um den Aspekt der Wirtschaftlichkeit zu ergänzen. Im Wirtschaftlichkeitsmodell werden relevanten Stakeholdern Kosten- und Nutzenelemente zugeordnet. Es bildet zudem die Abhängigkeiten zwischen Kosten, Nutzen und Wirtschaftlichkeit des Intelligenten Technischen Systems mittels geeignete Beziehungen ab.

#### **A5: Plausibilität**

Das Wirtschaftlichkeitsmodell stellt ein Abbild der Realität dar. Es ist so zu modellieren, dass es von allen an der Entwicklung beteiligten Disziplinen gleichermaßen verstanden werden kann. Ein Modell ist plausibel, wenn es die Grundsätze Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Richtigkeit erfüllt. Die Modellierungssprache für das Wirtschaftlichkeitsmodell hat somit neben der graphischen Notation, der abstrakten und konkreten Syntax auch Hilfsmittel bereitzustellen, welche die Modellierung unter Berücksichtigung dieser Grundsätze ermöglichen.

### **2.7.3 Anforderungen an die Analyse der Wirtschaftlichkeit**

Die im Folgenden dargestellten Anforderungen sind im Rahmen der Analyse der Wirtschaftlichkeit im Konzipierungsprozess zu berücksichtigen:

#### **A6: Lebenszykluskostenanalyse**

Im Rahmen einer wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung gilt es, die Lebenszykluskosten, die durch die prinzipielle Lösung für das Intelligente Technische System verursacht werden, zu analysieren. Die Kosten sind entsprechend im Wirtschaftlichkeitsmodell abzubilden und den relevanten Stakeholder zuzuordnen. Die Systematik hat geeignete Methoden zur Analyse und Bewertung der Kostenelemente im Wirtschaftlichkeitsmodell zur Verfügung zu stellen. Hierbei ist die Kostenstruktur zu berücksichtigen.

#### **A7: Kundenorientierte Analyse**

In der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung sollen die identifizierten Nutzenpotentiale sowie heutige und zukünftige Kundenbedürfnisse durch eine prinzipielle technische Lösung realisiert werden. Aus der Erschließung der Nutzenpotentiale sowie der Bedürfnisbefriedigung entsteht Nutzen für die Stakeholder. Dieser Nutzen ist im Wirtschaftlichkeitsmodell abzubilden und den relevanten Stakeholder zuzuordnen. Die Systematik

hat geeignete Methoden zur Analyse und Bewertung der Nutzenelemente im Wirtschaftlichkeitsmodell zur Verfügung zu stellen.

#### **A8: Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Elemente**

Bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit auf Basis der Prinzipiösung sind neben den Kosten, dem Nutzen und der Wirtschaftlichkeit auch deren Abhängigkeiten untereinander zu analysieren und zu bewerten. Hierzu bedarf es eines geeigneten Vorgehens im Rahmen der zu entwickelnden Systematik.

#### **A9: Berücksichtigung des Systemverhaltens**

Intelligente Technische Systeme sind in der Lage ihr Verhalten im Betrieb selbstständig an ihre Umgebung anzupassen. Die resultierende Systemdynamik nimmt Einfluss auf die Kosten und den Nutzen des Systems. Eine statische Analyse der Wirtschaftlichkeit ist daher nicht ausreichend. Vielmehr ist für Kosten- und Nutzenelemente eines Intelligenten Technischen Systems, welche sich gemäß dem Systemverhalten im Zeitverlauf verändern, eine Analyse und Bewertung der Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung des Systemverhaltens und der -dynamik notwendig.

### 3 Stand der Technik

Ziel des Kapitels ist ein systematisch hergeleiteter Handlungsbedarf für die Entwicklung einer Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Hierzu werden Methoden und Ansätze aus dem Stand der Technik vor dem Hintergrund der identifizierten Anforderungen aus Abschnitt 2.7 diskutiert.

Wirtschaften heißt wählen (vgl. Abschnitt 2.1.3), die Entscheidung für eine Lösungsalternative im Rahmen der Konzipierung erfolgt auf Basis der Bewertung von Kosten und Nutzen. Einen Überblick über Ansätze zur Bewertung von Lösungsalternativen gibt Abschnitt 3.1. Um sicherzustellen, dass die technische Lösung den notwendigen Zusatznutzen für den Kunden liefert und so am Markt erfolgreich ist, bedarf es einer kontinuierlichen Kundenorientierung im Produktentstehungsprozess. Ansätze zur Sicherstellung der Kundenorientierung werden in Abschnitt 3.2 beschrieben. Eine Nutzeninnovation kann nur realisiert werden, wenn neben dem Zusatznutzen auch eine Kostensenkung erfolgt. Ansätze zum Kostenmanagement in der Produktentwicklung werden in Abschnitt 3.3 vorgestellt. Da es sich bei den betrachteten Systemen um Intelligente Technische Systeme handelt, gilt es, bei ihrer Analyse bereits im Rahmen der Konzipierung das Systemverhalten zu berücksichtigen. Ansätze zur Abbildung des Systemverhaltens werden in Abschnitt 3.4 diskutiert. Ein Abgleich der Anforderungen aus Abschnitt 2.7 mit dem Stand der Technik ermöglicht die Ableitung des Handlungsbedarfs in Abschnitt 3.5.

#### 3.1 Ansätze zur Bewertung von Lösungsalternativen in der Produktentwicklung

Zur systematischen Durchführung der im Laufe der Entwicklung erforderlichen Bewertungen liefert der Stand der Technik verschiedene Bewertungsansätze. Für den Einsatz in der frühen Phase bieten sich insbesondere die Nutzwertanalyse und verwandte Ansätze (vgl. Abschnitt 3.1.1) sowie die technisch-wirtschaftliche Bewertung an (vgl. Abschnitt 3.1.2).

##### 3.1.1 Nutzwertanalyse und verwandte Ansätze

Die durch ZANGEMEISTER im Jahr 1970 vorgestellte **Nutzwertanalyse** ermöglicht die Analyse und Bewertung komplexer Handlungsalternativen mit einer Vielzahl von Bewertungskriterien (vgl. u.a. [Zan73]) [PBF+13, S. 390]. Sie stellt somit eine Planungsmethodik zur systematischen Entscheidungsvorbereitung unter reinen nicht monetär bewertbaren Nutzenkriterien dar [Sch74, S. 3], [Pat82, S. 279]. Die Nutzwertanalyse umfasst die folgenden vier Schritte [Pat82, S. 298]:

**Auswahl und Gewichtung der Bewertungskriterien:** In dieser Phase wird das Zielsystem systematisch aufgestellt. Hierzu wird zunächst der Bewertungsraum festgelegt sowie

Kriterien definiert, welche nicht zulässige Alternativen im Vorfeld aussortieren. Das Gesamtziel wird in disjunkte Teilziele unterteilt und gewichtet [Pat82, S. 297]. Zur Gewichtung kann ein paarweiser Vergleich eingesetzt werden [PBF+13, S. 395]. Es wird zwischen Knotengewichten  $g_k$  (Anteil am übergeordneten Teilziel) und Stufengewichten  $g_s$  (Anteil am Gesamtziel) unterschieden. Auf jeder Hierarchieebene ergeben die Gewichtungen einen Gesamtwert von eins [PBF+13, S. 391]. Ergebnis ist das in Bild 3-1 dargestellte Zielsystem.

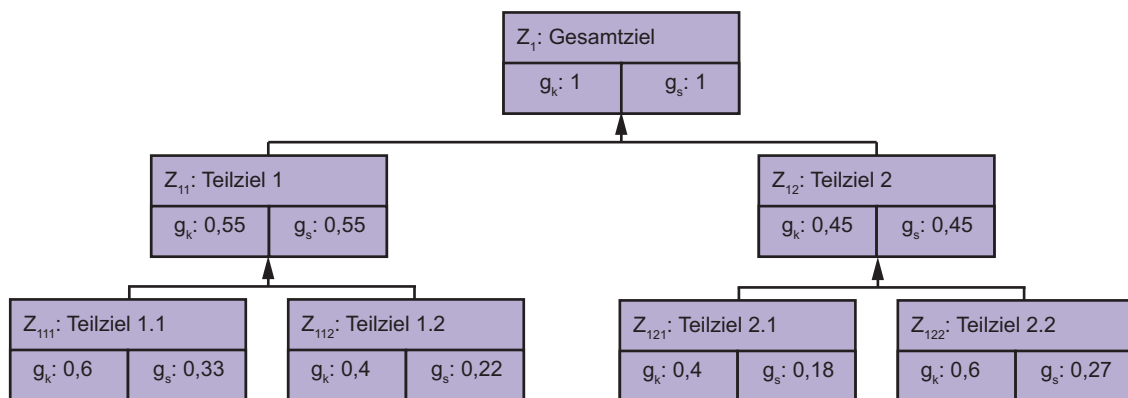


Bild 3-1: Struktur eines gewichteten Zielsystems in Anlehnung an [PBF+13, S. 391]

**Vorhersage der Leistungen der Alternativen je Bewertungskriterium:** In einer Nutzwertmatrix werden den jeweiligen Bewertungskriterien, die durch die Analyse der Alternativen ermittelten Eigenschaftsgrößen zugeordnet. Hierbei kann es sich um einen Kennwert oder verbale, möglichst konkrete Aussagen handeln [PBF+13, S. 391f.], [Pat82, S. 299].

**Bewertung der einzelnen Zilerträge je Bewertungskriterium:** Auf Basis der Nutzwertmatrix lassen sich Wertungszahlen für die einzelnen Zilerträge je Bewertungskriterium ermitteln. Die Bewertungsskala und der -maßstab reichen von *null* (unbrauchbare Lösung) bis *zehn* (ideale Lösung) [PBF+13, S. 392], [Pat82, S. 299f.]. Es gilt zu beachten, dass die Nutzenbewertung hierbei subjektiv und vom Bewertenden abhängig ist [Zan73, S. 50f.].

**Nutzwertrangfolge ermitteln:** Anhand der Nutzenbewertung der letzten Phase sowie der Zielgewichtungen der Bewertungskriterien werden die Zielwerte synthetisiert. Anhand des Gesamtnutzwerts wird der Vergleich der Alternativen ermöglicht und es kann eine Nutzwertrangfolge ermittelt werden. Auf ihrer Basis lässt sich eine Lösungsalternative auswählen [PBF+13, S. 392], [Pat82, S. 301f.].

Darüber hinaus kann zur Berücksichtigung von Ungewissheit bei der Bewertung eine Sensitivitätsanalyse<sup>43</sup> der Ergebnisse durchgeführt werden [Pat82, S. 303].

<sup>43</sup> Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann die Empfindlichkeit des Outputs in Abhängigkeit von bestimmten Parameterveränderungen identifiziert werden [KFG02, S. 42].



In der klassischen Nutzwertanalyse werden keine Kosten berücksichtigt [Pat82, S. 303]. Die **Nutzwert-Kosten-Analyse** ergänzt die Nutzwertanalyse (nicht monetär) um eine Kostenbetrachtung (monetär). RINZA und SCHMITZ nutzen hierzu eine Aufwandsanalyse welche sowohl monetäre (Kosten) als auch nicht monetäre (Aufwandswert) Bewertungskriterien berücksichtigt [RS92, S. 124f.]. Die Nutzwert-Kosten-Analyse umfasst somit neben den oben beschriebenen vier Phasen zwei weitere Phasen:

**Analyse der Kosten:** In dieser Phase werden zunächst die zu berücksichtigenden Kosten definiert und in einer Kostenstruktur abgebildet (vgl. Abschnitt 3.3.5). Die Ermittlung der Kosten erfolgt mit Hilfe geeigneter Kalkulationsverfahren (vgl. u.a. [Zir10, S. 54f.]). Auf Basis der Teilbewertungen wird ein Gesamtkostenwert berechnet. Abschließend erfolgen eine Sensitivitätsanalyse und die Darstellung der Ergebnisse [RS92, S. 126ff.].

**Analyse der Aufwandswerte:** Nicht monetär bewertbare Aufwände werden in Anlehnung an die Nutzwertanalyse bewertet. Hierzu wird zunächst eine Aufwandsstruktur erstellt und die einzelnen Aufwände gewichtet. Die Bewertung der Aufwände erfolgt anhand eines Vergleichs der Alternativen mittels einer Bewertungsskala und eines -maßstabs für den Aufwandswert von *eins* (sehr viel höher) bis *fünf* (sehr viel geringer). Die Aufwandswerte werden gewichtet und zu einem Gesamtwert aggregiert. Abschließend erfolgt ebenfalls eine Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse [RS92, S. 142ff.].

Die Auswahl einer Alternative erfolgt im Rahmen der Nutzwert-Kosten-Analyse neben der Nutzwertangfolge auch auf Basis der Kosten- und Aufwandswertangfolge [RS92, S. 145ff.].

Wird bei der Analyse der Nutzwert (nicht monetär) dem Aufwandswert (nicht monetär) einer Alternative gegenübergestellt, so wird von einer **Nützlichkeitsanalyse** bzw. **Aufwandswert-Nutzwert-Analyse** gesprochen [Pat82, S. 279]. Die **Kosten-Nutzen-Analyse** hingegen stellt eine absolute Bewertung von Projekten meist aus dem öffentlichen Bereich auf Basis monetär bewertbarer Kriterien. Ziel ist die Maximierung des „Wohlstands für die Gesellschaft“ [Pat82, S. 280], [Sch73, S. 280], [Mis75, S. 9].

## Bewertung

Die klassische Nutzwertanalyse unterstützt die Entwickler bei der Bewertung komplexer Handlungsalternativen mittels nicht monetär bewertbarer Kriterien zur Bewertung des Nutzens. Ihre Weiterentwicklungen berücksichtigen zudem die Kosten. Hierbei liegt der Fokus auf den Selbstkosten des Systems. Im Rahmen der Konzipierung können die Methoden bei der Analyse und Bewertung von Lösungsalternativen unterstützen und liefern somit eine Entscheidungsgrundlage. Direkte Abhängigkeiten zwischen Kosten und Nutzen sowie das Systemverhalten werden nicht berücksichtigt.

### 3.1.2 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Die technisch-wirtschaftliche Bewertung wird in der VDI-Richtlinie 2225 detailliert beschrieben und geht auf KESSELRING zurück [VDI2225-3, S. 2]. Einsatz findet die Bewertungsmethode zum Abschluss der Konzeptphase [PBF+13, S. 392]. Die Bewertung erfolgt wie in Bild 3-2 dargestellt in drei Phasen.

**Technische Bewertung:** Im ersten Schritt werden die Mindestanforderung und Wünsche aus der Anforderungsliste sowie die technischen Eigenschaften der konstruktiven Lösungen gesammelt. Darauf aufbauend werden die Bewertungsmerkmale ermittelt und mit Mitarbeitern und Kunden diskutiert. Die ausgewählten Merkmale werden dokumentiert und bewertet. Die Bewertung erfolgt über eine Punktbewertung von *null* (unbefriedigend) bis *vier* (ideal). Bezugsgröße ist dabei ein Produkt, welches die technische Ideallösung darstellt. Auf Basis der Bewertung können technische Schwachstellen identifiziert (Punktbewertung von 0 bis 2). Abschließend wird die technische Wertigkeit berechnet [VDI2225-3, S. 4ff.].

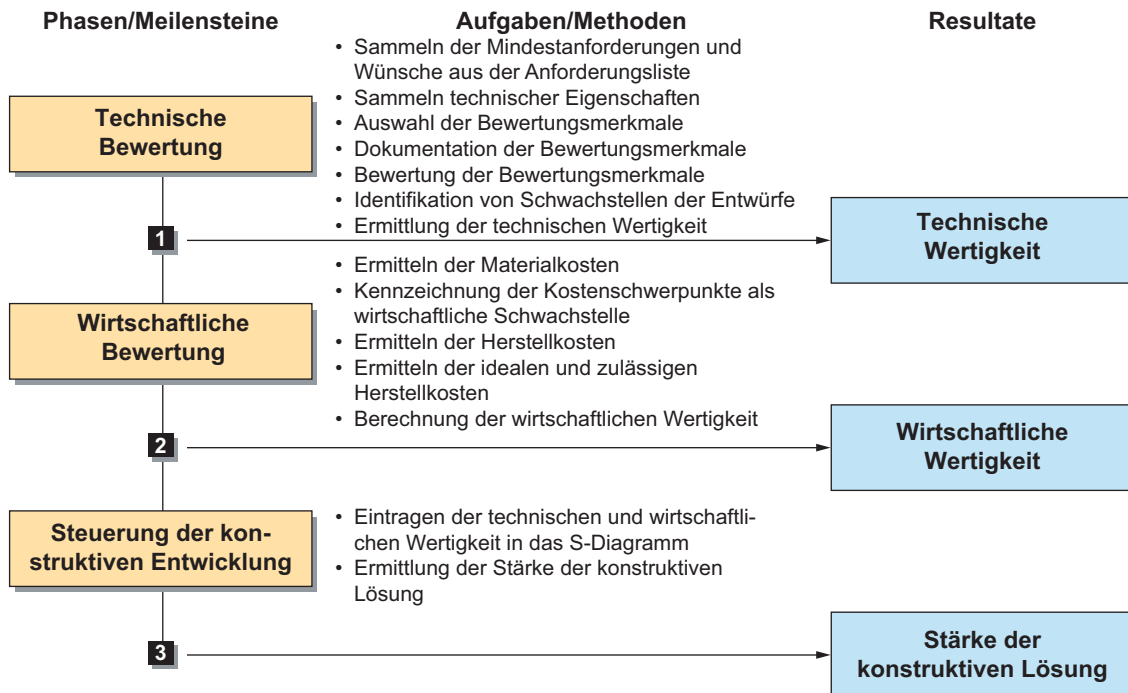


Bild 3-2: Vorgehen bei der technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach der VDI-Richtlinie 2225 [VDI2225-3, S. 6]

**Wirtschaftliche Bewertung:** Neben der Forderung nach geringen Herstellkosten können auch Forderungen bspw. nach Gewichtsreduktion des Produkts gestellt werden. Diese werden separat aufgeführt und bewertet. Für die wirtschaftliche Bewertung werden zunächst die Materialkosten abgeschätzt und Kostenschwerpunkte gekennzeichnet. Im nächsten Schritt werden die Herstellkosten abgeschätzt. Diese werden mit den idealen und zulässigen Herstellkosten abgeglichen. Sie sind das Resultat von Marktstudien und

den am Markt geforderten Preisen für Vergleichsprodukte. Abschließend wird die wirtschaftliche Wertigkeit berechnet [VDI2225-3, S. 5f.].

**Steuerung der konstruktiven Entwicklung:** Die technische Wertigkeit wird auf der Abszisse und die wirtschaftliche Wertigkeit auf der Ordinate des S-Diagramms abgebildet. Aus dem Diagramm lässt sich der jeweilige technisch-wirtschaftliche Wert der konstruktiven Lösung ablesen. Hierbei ist eine ausgeglichene Wertigkeit anzustreben [VDI2225-3, S. 6].

### **Bewertung**

Die technisch-wirtschaftliche Bewertung erfolgt im Rahmen des disziplinspezifischen Entwurfs insbesondere für die konstruktiven Lösungen. Die Methode liefert eine Entscheidungsgrundlage für die wirtschaftlichste Lösung und gibt Vorgaben zur Verbesserung im Rahmen der weiteren Entwicklung. In die Bewertung fließen die Herstellkosten sowie die Anforderungserfüllung der Lösung ein. Im S-Diagramm werden beide Wertigkeiten gegenübergestellt und somit die wirtschaftlichste Lösung ermittelt. Das Verhalten und die Dynamik des Systems fließen nicht in die Bewertung ein.

## **3.2 Ansätze zur Kundenorientierung im Produktentstehungsprozess**

Ausgangspunkt der Erfolgskette der Kundenorientierung sind heutige sowie zukünftige Kundenbedürfnisse bzw. -anforderungen, welche im Rahmen der Potentialfindung bspw. durch Methoden der qualitativen Marktforschung (vgl. u.a. [Sto10, S. 23ff.]), Delphi-Studien [GP14, S. 88f.], Trendanalysen<sup>44</sup>, die Szenario-Technik [GP14, S. 44ff.], Erfolgsfaktoren-Analysen [GP14, S. 139f.] usw. ermittelt werden können. Beispielhaft wird die Ermittlung von Nutzenpotentialen<sup>45</sup> nach PÜMPIN auf Basis einer Trendanalyse in Abschnitt 3.2.1 vorgestellt. Zur Ermittlung der Kundenpräferenzen von Attributen des Systems kann die Conjoint-Analyse aus Abschnitt 3.2.2 eingesetzt werden. Auf Basis der Bewertung der Attribute kann die Kundenzufriedenheit wie in Abschnitt 3.2.3 dargestellt ermittelt werden. Diese beeinflusst den Wert des Unternehmens, die Zusammenhänge werden in Abschnitt 3.2.4 diskutiert.

---

<sup>44</sup> Eine mögliche zukünftige Entwicklung wird als Trend bezeichnet, wenn sie eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit sowie Auswirkung auf die Geschäftstätigkeit aufweist [Hor98, S. 7f.], [GP14, S. 91]. Methoden zur Trendanalyse liefern u.a. [GP14, S. 90ff.], [HHS+07, S. 64ff.], [Pil07, S. 138ff.], [FS06, S. 127ff.] und [KH99, S. 55ff.].

<sup>45</sup> BURGER nutzt die Nutzenpotentiale bspw. zur Bewertung des Nutzens beim Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in der rechnerintegrierten Produktion [Bur97, S. 94ff.].

### 3.2.1 Nutzenpotentiale nach PÜMPIN

Im Mittelpunkt des Dynamik-Prinzips nach PÜMPIN steht die Steigerung des Nutzens für die Stakeholder einer Unternehmung [Püm92, S. 31]. Die Entfaltung der Dynamik erfolgt insbesondere durch die Ausschöpfung attraktiver Nutzenpotentiale [Püm92, S. 37]. **Nutzenpotentiale** sind eine *in der Umwelt, im Markt oder im Unternehmen latent oder effektiv vorhandene Konstellation* [Püm92, S. 49f.]. Sie lassen sich durch Aktivitäten des Unternehmens erschließen und stiften Nutzen für die Stakeholder und das Unternehmen [Püm92, S. 50]. Veränderungen in der Umwelt lassen sich u.a. durch Trends beschreiben [Hor98, S. 7f.]. Aus den identifizierten Trends lassen sich die Nutzenpotentiale für die Unternehmung ableiten [Püm92, S. 58]. Sie können entweder außerhalb oder innerhalb des betrachteten Unternehmens liegen. Es wird daher zwischen externen und internen Nutzenpotentialen unterschieden (vgl. Bild 3-3). Der Lebenszyklus der Nutzenpotentiale lässt sich in die vier Phasen Entstehung, Wachstum, Reife und Niedergang unterteilen [Püm92, S. 60ff.].

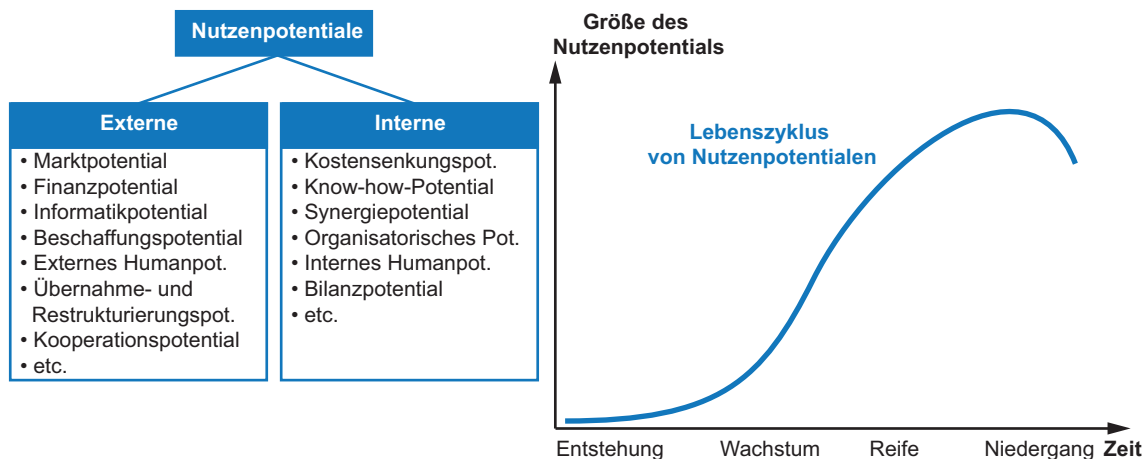


Bild 3-3: Externe und interne Nutzenpotentiale und ihr Lebenszyklus nach PÜMPIN [Püm92, S. 62 u. S. 98]

- 1) **Entstehungsphase:** Der Trend ist noch nicht vollständig eingetreten und das Unternehmen hat noch nicht die nötige Erfahrung zur Erschließung des Nutzenpotentials. Die Folge: Ausschöpfung des Nutzenpotentials führt zu geringem Geschäftsvolumen.
- 2) **Wachstumsphase:** Trend und Erfahrung des Unternehmens sind ausreichend ausgebildet, um das Nutzenpotential nutzenstiftend zu erschließen. Besonderheit: Zunahme des Geschäftsvolumens mit jeder Transaktion.
- 3) **Reifephase:** Verschiedene Faktoren können zu einem Abfall der Geschäftstätigkeiten führen, bspw. neue Entwicklungen in der Umwelt.
- 4) **Niedergangsphase:** Für marktbezogene Nutzenpotentiale kann ein Rückgang der Nachfrage zum Niedergang führen.

Ein Unternehmen sollte somit attraktive Nutzenpotentiale zu Beginn der Wachstumsphase durch neuartige Geschäftstätigkeiten erschließen [Püm92, S. 102].

### **Bewertung**

Die Ermittlung von Nutzenpotentialen nach PÜMPIN liefert einen Ansatz zur Ermittlung von zukünftigen Potentialen, welche durch die technische Lösung erschlossen, Nutzen für den Kunden und das Unternehmen stiften. Es liefert somit die Grundlage für die Kundenorientierung im Rahmen der Konzipierung.

### **3.2.2 Conjoint-Analyse**

Die Conjoint-Analyse gehört zu den multivariaten Analyseverfahren, welches die Analyse des Nutzens einzelner Produktattribute für den Kunden fokussiert. Die Analyse ermöglicht eine Aussage über den Anteil den ein Attribut am Gesamtnutzen des Produkts besitzt. Sie wird bspw. im Rahmen der Zielpreisfindung im Target Costing (vgl. Abschnitt 3.3.1) eingesetzt. Voraussetzung für die Befragung ist ein konkretes Produktkonzept [BEP+11, S. 459], [Hom12, S. 405f.]. Die Analyse umfasst die in Bild 3-4 dargestellten Analyseschritte.

**Erstellung des Erhebungsdesigns:** Im ersten Schritt wird das Produkt analysiert und die Eigenschaften ermittelt, welche präferenzrelevant, beeinflussbar und unabhängig voneinander sind. Für diese Eigenschaften, wie bspw. Preis oder Verpackung, werden mögliche Ausprägungen ermittelt. Diese müssen in einer kompensatorischen Beziehung zueinander stehen, dürfen nicht als Ausschlusskriterien dienen und sollten zudem nur eine begrenzte Anzahl umfassen. Durch Kombination der Eigenschaftsausprägungen mittels der Profilmethode oder der Zwei-Faktoren-Methode ergeben sich Stimuli, welche das vollständige Erhebungsdesign beschreiben. Zur besseren Handhabbarkeit wird eine zweckmäßige Teilmenge aus den Stimuli ausgewählt. Ergebnis ist das reduzierte Erhebungsdesign [BEP+11, S. 462ff.].

**Durchführung der Erhebung:** Mittels des Erhebungsdesigns erfolgt die Bewertung der Eigenschaftskombinationen durch die Auskunftspersonen. Hierbei erfolgt bspw. eine Rangreihung der Stimuli nach ihrer Wichtigkeit [BEP+11, S. 468f.].

**Ermittlung der Nutzwerte:** Basierend auf den empirisch ermittelten Rangdaten wird mittels der Conjoint-Analyse für jede Eigenschaft der Teilnutzenwert ermittelt. Darauf aufbauend wird der metrische Gesamtnutzenwert für alle Stimuli sowie die relative Wichtigkeit der einzelnen Eigenschaften berechnet. Ergebnis sind die Nutzenwerte einzelner Auskunftspersonen. Um eine umfassende Aussage treffen zu können, werden die ermittelten Nutzwerte aggregiert [BEP+11, S. 469ff.].

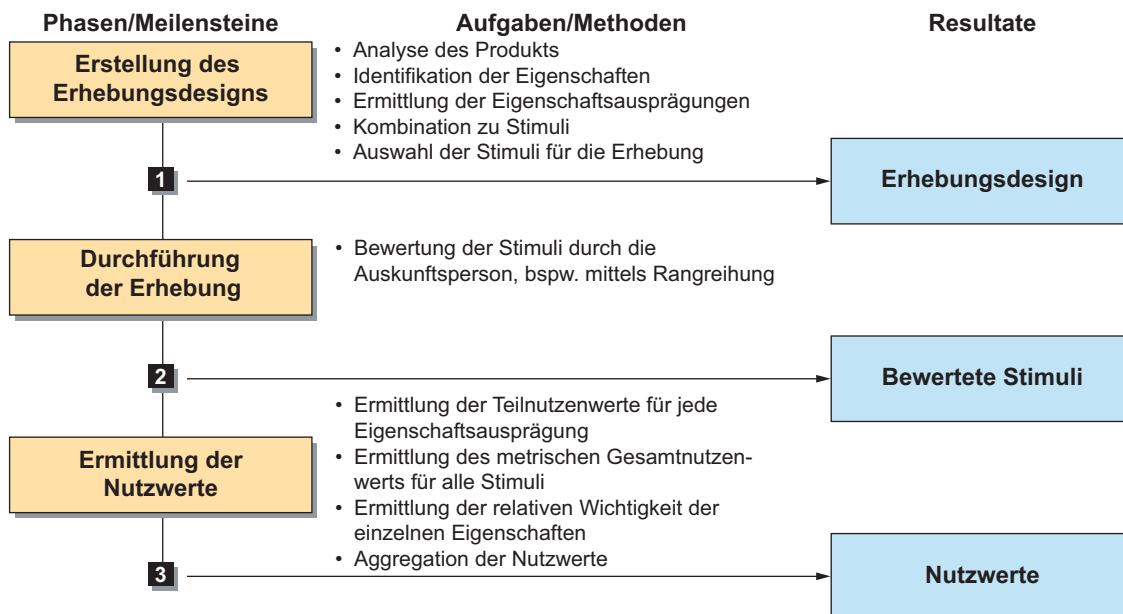


Bild 3-4: Vorgehen bei der Conjoint-Analyse in Anlehnung an [BEP+11, S. 462ff.]

Im Rahmen des Spitzenclusters it's OWL wurde ein toolunterstütztes Verfahren zur frühzeitigen Akzeptanzmessung Intelligenter Technischer Systeme entwickelt, welches auf der Limit-Conjoint-Analyse aufbaut. Die Stimuli werden hierbei durch virtuelle Prototypen, im sogenannten Marktlab, abgebildet [BJ12-ol, S. 5ff.], [Bun14, S. 128f.].

### Bewertung

Bei der Conjoint-Analyse handelt es sich um ein vergleichsweise aufwendiges Verfahren [Bri10, S. 118]. Sie eignet sich zur Ermittlung von Kundenpräferenzen und Nutzwerten einzelner Produkteigenschaften für bestehende Produktkonzepte. Mit Hilfe des Marktlabs kann auf Basis virtueller Prototypen ein Verständnis für das Produkt bei den Befragten geschaffen werden. Es wird somit eine Entscheidungsgrundlage für eine Lösung auf Basis der Kundenpräferenzen ermöglicht und ein Rahmen für die Entwicklung gegeben, da die Conjoint-Analyse zudem zur Zielpreisfindung eingesetzt werden kann.

### 3.2.3 Ansätze zur Bewertung von Kundenzufriedenheit

Der Ansatz von KANO ET AL. zur Bewertung der Kundenzufriedenheit<sup>46</sup> ist in der Praxis weit verbreitet [BKR+07, S. 880]. Aufbauend auf den Kundenbedürfnissen werden Produktattribute formuliert und als Begeisterungs-, Leistungs- oder Basisattribute klassifiziert [KST+84, S. 39ff.], [Bri10, S. 44]. Während bei KANO ET AL. die Abhängigkeit der Funktionalität des Produkts und der Kundenzufriedenheit betrachtet wird, findet in der

<sup>46</sup> Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dem Mehr-Faktoren-Modell der Kundenzufriedenheit gefolgt. Die Literatur bietet eine Vielzahl von Theorien und Konzepten zur Entstehung von Kundenzufriedenheit. Für einen Überblick über diese sei auf [HS08, S. 23ff.], [MB09, S. 269ff.] und [MSS09, S. 321f.] verwiesen.

Zufriedenheitsforschung die Erwartungserfüllung Berücksichtigung [KH98, S. 267ff.], [HS08, S. 32f.], [BKR+07, S. 881]. Die Kundenzufriedenheit resultiert nach dem Confirmation/Disconfirmation-Paradigma aus einem Vergleichsprozesses zwischen der vor dem Kauf eines Produkts erwarteten und der durch den Kunden wahrgenommenen Leistung; also dem erwarteten und erlebten Nutzen eines Attributs<sup>47</sup> (vgl. Abschnitt 2.5.3). Diesem Verständnis wird im Rahmen dieser Arbeit gefolgt.

Bild 3-5 zeigt die Einordnung der Attributklassen in das Kano-Diagramm. Die Erwartung des Kunden wird auf der Abszisse und die Kundenzufriedenheit auf der Ordinate aufgetragen. Für die drei Klassen ergeben sich unterschiedliche Abhängigkeiten zwischen Erwartungserfüllung und Kundenzufriedenheit [KST+84, S. 39ff.], [BKR+07, S. 882].

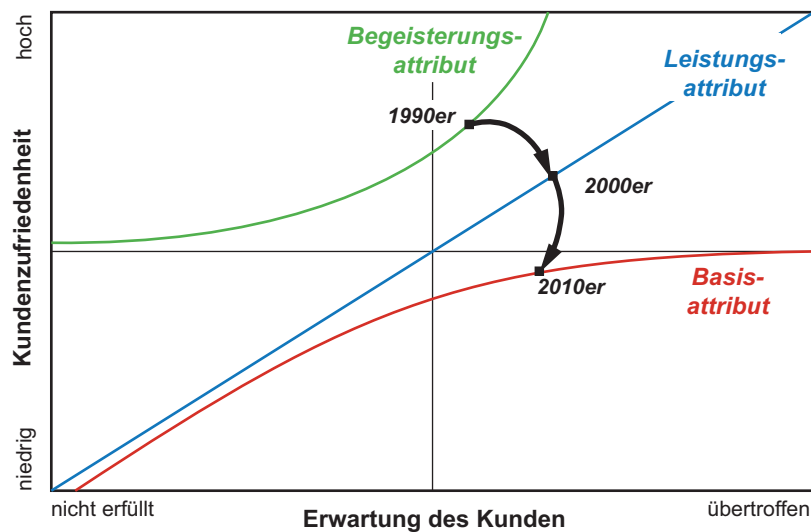


Bild 3-5: Kano-Modell in Anlehnung an [KST+84, S. 39ff.], [Sau00, S. 28]

- **Begeisterungsattribut:** Diese Attribute werden vom Kunden nicht explizit nachgefragt. Sie sind meist so innovativ, dass der Kunden noch keine Erwartung gebildet hat. Die Kundenzufriedenheit steigt für Begeisterungsattribute überproportional an und sinkt nicht unter das Konfirmationsniveau. Ein Beispiel ist die Integration eines aktiven Parkassistenten in ein Automobil.
- **Leistungsattribut:** Der Kunde verlangt Leistungsattribute explizit. Die Kundenzufriedenheit steigt und fällt proportional zum Erfüllungsgrad seiner Erwartungen, wenn diese übertroffen bzw. nicht erfüllt werden. Elektrische Fensterheber können beim Automobil der Klasse der Leistungsattribute zugeordnet werden.
- **Basisattribut:** Es handelt sich hierbei um Attribute, deren Erfüllung vom Kunden als selbstverständlich vorausgesetzt wird. Meist sind diese Attribute dem Kunden nur unterbewusst bekannt. Die Kundenzufriedenheit fällt überproportional stark, wenn

<sup>47</sup> Weitere Arbeiten, wie [EU02, S. 107ff.] und [Woo97, S. 143], bestätigen diesen Zusammenhang.

Basisattribute, wie der Fahrersairbag im Automobil, nicht erfüllt werden. Eine Übererfüllung von Basisattributen hat hingegen keine Steigerung der Kundenzufriedenheit zur Folge, sie bleibt auf Konfirmationsniveau.

Bei der Einordnung eines Attributs<sup>48</sup> in eine Klasse ist zu beachten, dass diese durch verschiedene, in sich homogene Kundensegmente unterschiedlich erfolgen kann [BKR+07, S. 884]. Auch eine Veränderung über den Zeitverlauf ist zu berücksichtigen [HS08, S. 27ff.]. Zudem setzt sich die Kundenzufriedenheit insgesamt aus den Teilbewertungen der Attribute durch den Kunden zusammen. Die Folge: Der Kunde kann mit einzelnen Attributen des Produkts (un-)zufrieden sein und trotzdem ein positives Gesamturteil treffen [KST+84, S. 39ff.].

Beim Modell nach KANO ET AL. handelt es sich um eine graphische und rein qualitative Darstellung [BKR+07, S. 883]. Zur Anwendung der Methode im Rahmen der vorliegenden Arbeit bedarf es einer Quantifizierung der Kundenzufriedenheit<sup>49</sup> wie sie BUHL ET AL. liefern. Basierend auf dem Stand der Technik und den daraus resultierenden Nebenbedingungen haben sie Funktionen für die Entwicklung der Kundenzufriedenheit innerhalb der drei Attributklassen abgeleitet. Mit diesen lässt sich in Abhängigkeit vom Wert für die Erfüllung der Kundenerwartungen die Kundenzufriedenheit berechnen [BKR+07, S. 883ff.]. Nach DESCHAMPS ET AL. lässt sich auf Basis des Konzepts Image/Wert/Zufriedenheit und dem Kano-Modell ein aussagekräftiges Modell der Kundenpräferenzen erstellen [DNL96, S. 91].

## **Bewertung**

Der Ansatz nach KANO ET AL. ermöglicht die Ermittlung der Kundenzufriedenheit und bietet ein Modell, welches die Kundenpräferenzen abbildet. Es liefert somit Vorgaben für die Entwicklung hinsichtlich der kundenorientierten Ausgestaltung des Systems. Durch die graphische Darstellung wird das Verständnis für den Nutzen bei den Entwicklern gefördert und eine Entscheidungsgrundlage basierend auf dem Nutzen bereitgestellt. Die Kosten über den Lebenszyklus werden nicht in die Entscheidung einbezogen.

---

<sup>48</sup> Für die Identifikation der Basis-, Leistungs- und Begeisterungsattribute werden in der Literatur verschiedene Ansätze vorgeschlagen (vgl. [MSS09, S. 324ff.]). Nach KANO ET AL. erfolgt die Einordnung bspw. anhand eines Fragebogens [KST+84, S. 39ff.].

<sup>49</sup> In der einschlägigen Literatur werden verschiedene Verfahren zu Messung der Kundenzufriedenheit vorgeschlagen (vgl. [Beu08, S. 126ff.]). Die Befragung der Kunden erfolgt hierbei durch Methoden der qualitativen Marktforschung. Da sich die vorliegende Arbeit auf die frühe Phase des Produktentstehungsprozesses fokussiert, ist eine direkte Einbindung des Kunden in den Konzipierungsprozess insbesondere bei radikalen Innovationen häufig nicht sinnvoll (vgl. [KN12, S. 8f.]). Aus diesem Grund wird auf das vorgestellte mathematische Erklärungsmodell der Kundenzufriedenheit zurückgegriffen.



### 3.2.4 Einfluss der Kundenzufriedenheit auf den Unternehmenswert

Wie in Abschnitt 2.5.3 aufgezeigt wird ein Zusammenhang zwischen der Steigerung der Kundenzufriedenheit und dem Unternehmenswert postuliert. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden genauer betrachtet. In der einschlägigen Literatur<sup>50</sup> wird der Einfluss der Kundenzufriedenheit auf verschiedene Aspekte diskutiert und in empirischen Studien nachgewiesen. HOMBURG und BUCERIUS fassen diese zur Wirkungskette der Kundenzufriedenheit zusammen [HB08, S. 65]. MATZLER und STAHL konkretisieren diese Wirkungskette weiter und geben einen guten Überblick über die Einflussfaktoren [MS00, S. 631].

Wie Bild 3-6 zeigt, beeinflusst die Kundenzufriedenheit auf der ersten Stufe die Kundenloyalität positiv [HB08, S. 57]. Die Kundenloyalität kann durch die Faktoren *Wiederkauf*, *Cross-Selling*, *niedrige Preissensibilität* sowie *positive Mundwerbung* ausgedrückt werden. Loyale Kunden werden die Produkte des Unternehmens erneut nachfragen; die Wiederkaufsrate wird also erhöht. Durch eine höhere Wiederkaufsrate werden auf der zweiten Stufe Akquisitions- und Beziehungskosten gesenkt.

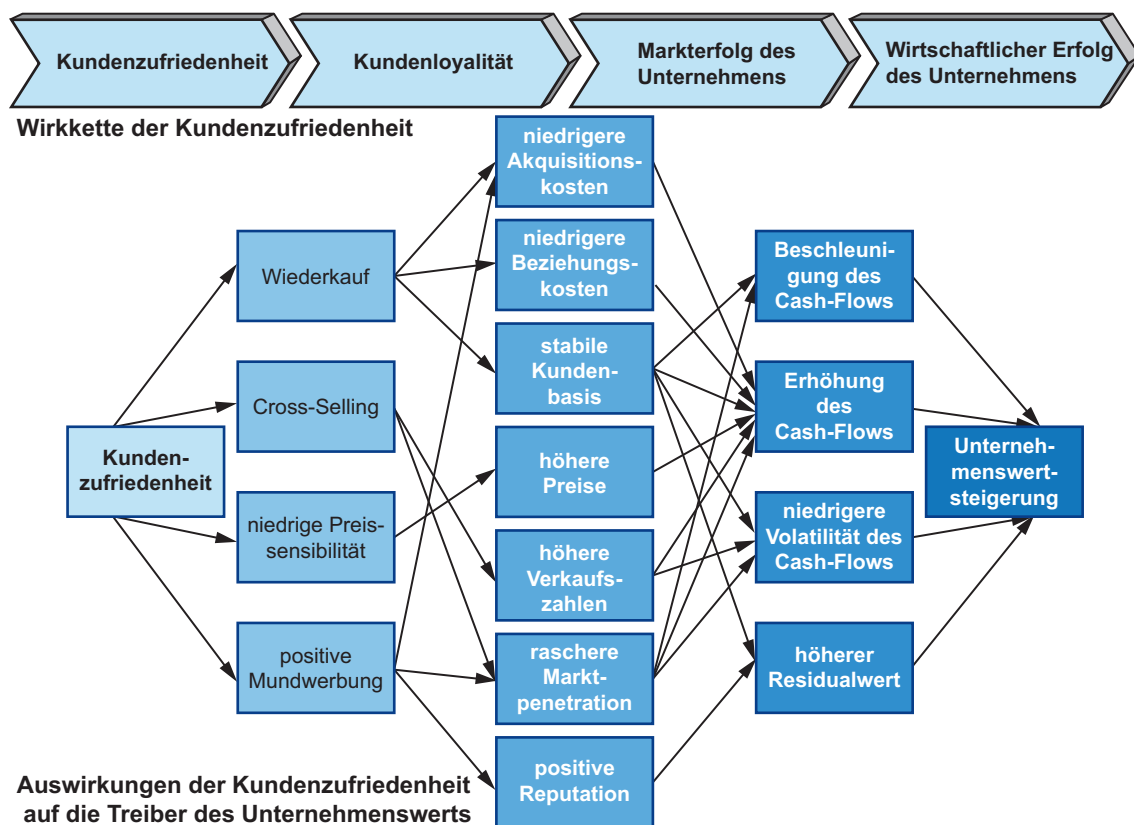


Bild 3-6: Wirkungskette der Kundenzufriedenheit [HB08, S. 65] und Wirkung der Kundenzufriedenheit auf die Treiber des Unternehmenswerts [MS00, S. 631]

<sup>50</sup> Für einen detaillierten Überblick sei u.a. auf [Gie00], [HB08], [MSH09] und [MS00] verwiesen.

Diese Reduktion der Kosten wirkt sich auf der nächsten Stufe wiederum positiv auf den Cash-Flow des Unternehmens aus. Der Erfolg des Unternehmens am Markt steigt. Das Ergebnis: Der wirtschaftliche Erfolg des Unternehmens wird gesteigert und somit auch der Unternehmenswert [HB08, S. 56ff.], [MS00, S. 630ff.], [MSH09, S. 7ff.].

Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen Kundenzufriedenheit und dem Unternehmenswert. MATZLER und STAHL postulieren auf Basis von empirischen Untersuchungen einen nicht linearen, sattelförmigen Zusammenhang. Die Stärke des Zusammenhangs ist dabei abhängig von der Wettbewerbsintensität und weiteren Faktoren. Wie Bild 3-7 zeigt, können vier Zonen unterschieden werden. Innerhalb der Indifferenzzone führt der Vergleich zwischen erwartetem und erlebtem Nutzen zur Konformität beim Kunden. Unterhalb dieser Zone ist der Kunde unzufrieden. Mögliche Folge: Der Kunde kauft das Produkt der Konkurrenz, der Unternehmenswert sinkt. Enttäuschte Kunden haben also einen negativen Einfluss auf den Unternehmenswert. Wird der Kunde von der Leistung des Produkts überrascht, steigt seine Loyalität zum Unternehmen. Er wird seine positiven Erfahrungen weitererzählen. Begeisterte Kunden üben einen positiven Einfluss auf den Unternehmenswert aus. Oberhalb der Zone der Begeisterung befindet sich die Zone der Übertreibung. Ab einem gewissen Zufriedenheitsgrad steigt die Zufriedenheit des Kunden nicht weiter an. Ein sehr zufriedener Kunde kann also nicht noch zufriedener werden (vgl. [BKR+07, S. 885]). Da durch „Overservicing“ erfahrungsgemäß auch die Kosten für das Produkt steigen, kann dies wiederum negative Einflüsse auf den Unternehmenswert besitzen [MS00, S. 636ff.], [MSH09, 14f.].

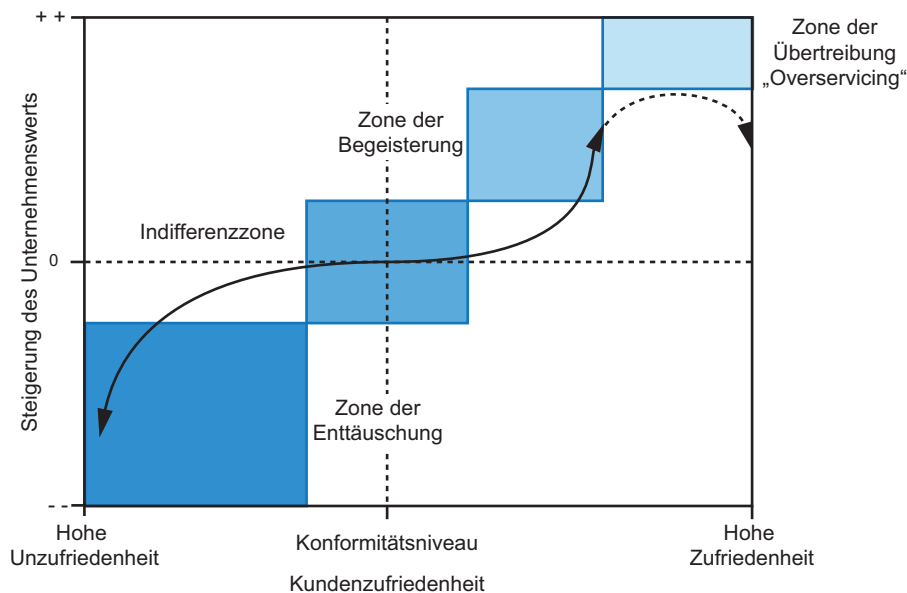


Bild 3-7: Postulierter Zusammenhang zwischen Kundenzufriedenheit und Unternehmenswert [MS00, S. 637]

## Bewertung

Die Wirkungskette der Kundenzufriedenheit liefert eine Abbildung der Abhängigkeiten zwischen Kundenzufriedenheit und Unternehmenswert und liefert ein parametrisches Modell zu dessen Berechnung. Es liefert eine Entscheidungsgrundlage für eine Lösungsalternative auf Basis des Unternehmenswerts und ermöglicht eine kundenorientierte Analyse des zu entwickelnden Systems.

### 3.3 Ansätze zum Kostenmanagement in der Produktentwicklung

Nach einer Studie aus dem Jahr 2007 zur Kostentransparenz in der Mechatronik werden folgende Methoden in den befragten Unternehmen im Rahmen des Kostenmanagements eingesetzt: Target Costing (24,4%), Wertanalyse (21,9%), ABC-Analyse<sup>51</sup> (15,0%), Kostenschätzungen/Vorkalkulationen<sup>52</sup> (8,8%), Benchmark<sup>53</sup> (6,9%), Prozesskostenrechnung<sup>54</sup> (3,8%), interne Workshops (2,5%) und selbst entwickelte Tools (1,9%). 8,1% der Befragten machten keine Angaben weitere 6,9% nannten Methoden, wie Quality Function Deployment<sup>55</sup> (QFD) und die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), bei denen die Autoren der Studie keinen direkten Zusammenhang zum Kostenmanagement sehen [BHL07, S. 42]. In den folgenden Abschnitten werden die im Rahmen der Arbeit relevanten Methoden vorgestellt sowie um weitere ergänzt.

Das Target Costing und die Wertanalyse stellen methodische Ansätze zur Ermittlung zulässiger Kosten dar. Sie sind (nahezu) deckungsgleich mit den Ansätzen des Design-to-Cost (vgl. [Bri10, S. 50]). Die beiden Ansätze werden exemplarisch in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 vorgestellt. In Abschnitt 3.3.3 wird ein Leitfaden vorgestellt, welcher das Target Costing auf den Systementwurf mechatronischer Systeme überträgt. Den Einsatz

---

<sup>51</sup> Die ABC-Analyse (Paretoanalyse) bietet eine Möglichkeit zur Strukturierung bei der bspw. die Systemelemente hinsichtlich ihrem Anteil an einer Eigenschaft, in diesem Fall Kosten, in drei Klassen eingeteilt werden. Als Vereinfachung kann auch die 80/20-Regel Anwendung finden (d.h. 20 Prozent der Teile machen 80 Prozent der Kosten aus). Auf Basis der resultierenden Kostenstruktur lassen sich Ansatzpunkte für Verbesserungen identifizieren [EKL07, S. 81f.].

<sup>52</sup> ZIRKLER gibt einen guten Überblick über Kostenschätz- und Vorkalkulationsverfahren für die an der Entwicklung mechatronischer Systeme beteiligten Disziplinen [Zir10, S. 54ff.].

<sup>53</sup> Benchmarking bezeichnet den Vergleich von Leistungsmerkmalen von Produkten oder Prozessen mit den Besten, bspw. Mitbewerber, auf dem Gebiet. Einen Überblick über das Vorgehen beim Kosten-Benchmarking geben [EKL07, S. 367ff.], [Kre97, S. 278ff.].

<sup>54</sup> Die Prozesskostenrechnung wurde erstmals durch MILLER und VOLLMAN vorgestellt. Ziel ist die Berechnung der Gemeinkosten nicht über Zuschlagsrechnung sondern auf Basis der tatsächlich in Anspruch genommenen Prozesse [MV85, S. 142ff.]. Weiterentwicklungen hinsichtlich ressourcenbasierter Prozesskostenrechnung finden sich u.a. bei COOPER und KAPLAN [CK88a, S. 20ff.], [CK88b, S. 96ff.], [CK92, S. 1ff.].

<sup>55</sup> Ziel des Quality Function Deployments ist eine technische Lösung, die auf die Kundenanforderungen abgestimmt ist. Sie stammt ursprünglich aus dem Qualitätsmanagement [Aka92].

des Target Costings im Rahmen der strategischen Produktplanung zeigt Abschnitt 3.3.4 exemplarisch als Teil der Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien.

Die Abbildung von Kosten kann mit Hilfe der Kostengliederungsstruktur (Cost Break-down Structure) in Abschnitt 3.3.5 erfolgen. Dieses Kostenmodell bildet neben den Selbstkosten des Produkts auch die Kosten über den Lebenszyklus ab. Ansätze zur Analyse der Lebenszykluskosten werden in Abschnitt 3.3.6 vorgestellt. Einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten im Lebenszyklus hat die Verlässlichkeit des Systems [DIN60300, S. 9f.]. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 3.3.7 die FMEA sowie deren kostenorientierte Weiterentwicklungen vorgestellt.

### 3.3.1 Target Costing

Das Target Costing dient der zielkostengerechten Produktentwicklung. Es wurde in Japan entwickelt und ist dort seit den 1970er Jahren im Einsatz [Bri10, S. 50], [Sei93, S. 5]. Heute existieren vielfältige Ansätze, die SEIDENSCHWARZ in marktorientierte<sup>56</sup>, ingenieursorientierte<sup>57</sup> und produktfunktionsorientierte Target Costing Ansätze unterteilt. Bereits im Jahr 1998 gaben 47 Prozent der befragten Unternehmen im Rahmen einer Untersuchung an, dass ihre Zielkostenfestlegung in Höhe der vom Markt erlaubten Kosten mit Hilfe des Target Costings erfolgt („Market into Company“) [Arn01, S. 292].

Der produktfunktionsorientierte<sup>58</sup> Ansatz nach TANAKA berücksichtigt sowohl die Markt- als auch Ingenieurssicht und ist daher insbesondere für die Konzipierung als Schnittstelle zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung geeignet [Sei93, S. 6]. Bild 3-8 zeigt die Vorgehensweise im Target Costing. Die vier Phasen werden im Folgenden beschrieben:

**Funktionshierarchie des Produkts ermitteln:** In der ersten Phase werden die Kundenanforderungen analysiert und Funktionen für das zu entwickelnde Produkt abgeleitet. Wie bei der Wertanalyse (vgl. Abschnitt 3.3.2) werden harte (produktbezogene) und weiche (nutzerbezogene) Funktionen unterschieden. Die harten Funktionen werden als Funktionshierarchie strukturiert. Für die weichen Funktionen wird eine Darstellung gewählt, die einen Vergleich hinsichtlich ihrer Wichtigkeit ermöglicht [Tan89, S. 56ff.].

---

<sup>56</sup> Beim marktorientierten Target Costing wird die Marktwirkung des Kostenmanagements bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung berücksichtigt (vgl. Target-Costing-Ansätze von HIROMOTO [Hir88] und SEIDENSCHWARZ [Sei93, S. 115ff.]). HORVÁTH ET AL. zeigen in [Hor93] zudem die Anwendung dieser Ansätze in der deutschen Praxis.

<sup>57</sup> Die Target Costing-Ansätze nach SAKURAI und MONDEN gehören zu den ingenieursorientierten Ansätzen [Mon89, S. 15ff.]. Sie zeigen insbesondere das Vorgehen des Target Costings im Rahmen der Produktentwicklung auf [Sei93, S. 6].

<sup>58</sup> EHRENSPIEL ET AL. liefern einen praxisorientierten Ansatz zum Target Costing, der u.a. auf TANAKA [Tan89, S. 56ff.] aufbaut [EKL07, S. 46ff.].

**Bedeutungsgrade der Funktionen ermitteln:** Die ermittelten Funktionen werden in Phase zwei hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Kunden bewertet [Tan89, S. 60].

Die Kundenpräferenzen sowie der Zielpreis (Preis, den der Kunde gewillt ist zu zahlen) lassen sich bspw. durch eine Conjoint-Analyse ermitteln (vgl. Abschnitt 3.2.2) [EKL07, S. 66].

**Zielkosten ermitteln:** Aus dem Zielpreis lassen sich nach Abzug der Gewinnmarge sowie der Overheadkosten die Zielkosten für das Produkt ableiten. Den Funktionen werden gemäß ihres Bedeutungsgrads die Zielkosten anteilig zugewiesen [EKL07, S. 64f.].

**Zielkostenkontrolldiagramm erstellen:** Abschließend werden die anteiligen Kosten über den Bedeutungsgrad der erfüllten Funktion im Zielkostendiagramm abgetragen. Die ausgewählten Lösungselemente weisen ein angemessenes Kosten-Nutzen-Verhältnis auf, wenn sie in der Zielkostenzone liegen. Im Optimalfall ist dieses Verhältnis gleich Eins [Tan89, S. 61ff.], [Bri10, S. 51].

SEIDENSCHWARZ ET AL. sehen als Kerninstrumente des projektspezifischen Target Costings neben den oben beschriebenen Phasen die vorgelagerten Phasen des Marktvorbau (vgl. Abschnitt 3.2.1) sowie das Kundenbegeisterungsmodell (vgl. Abschnitt 3.2.3) [SEN+97, S. 105ff.].

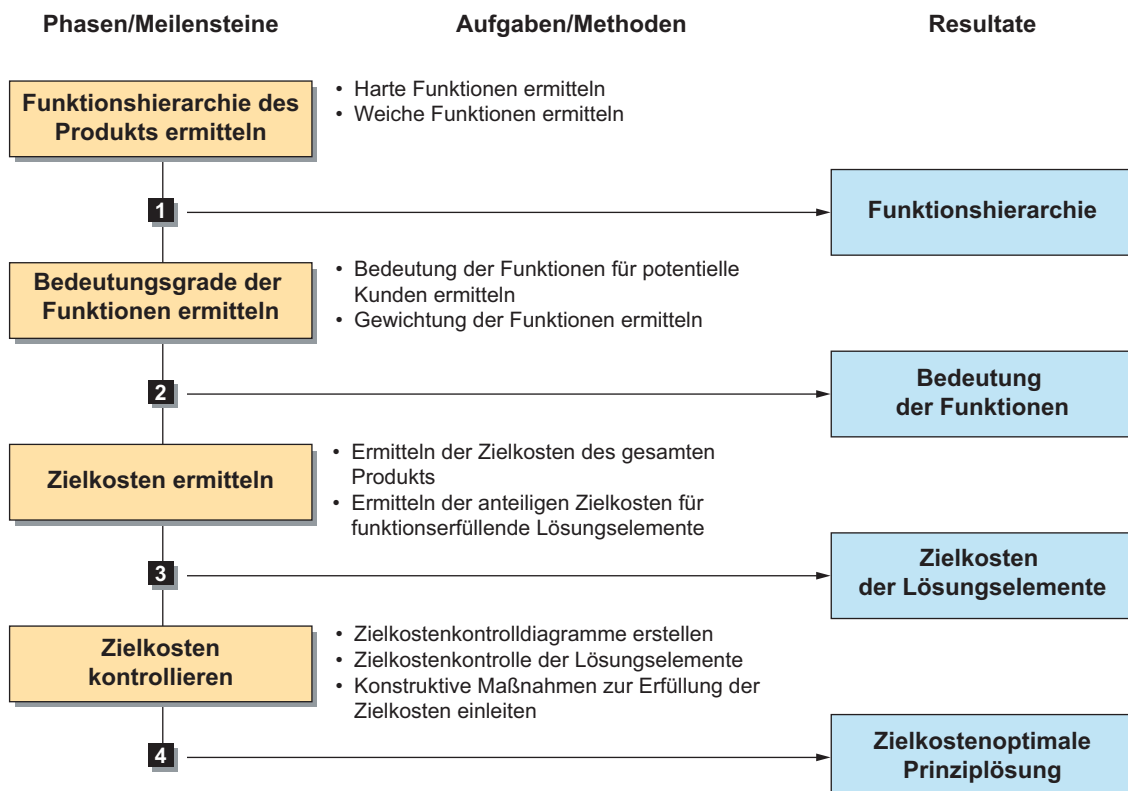


Bild 3-8: Vorgehen im Target Costing nach TANAKA [Tan89, S. 49ff.], [Bri10, S. 51]

## Bewertung

Das Target Costing bewertet den Nutzen und die Selbstkosten einer Lösungsvariante auf Basis der Funktionen des Systems und lässt sich somit im Rahmen der Konzipierung einsetzen. Das Vorgehen unterstützt das Verständnis für die Entstehung der Kosten und des Nutzens. Die Ergebnisse der Analyse liefern somit eine Entscheidungsgrundlage für eine Lösungsvariante. Durch die Ermittlung der zulässigen Zielkosten und Berücksichtigung des Nutzens wird die Kundenorientierung unterstützt. Eine Analyse der gesamten Lebenszykluskosten erfolgt nicht.

### 3.3.2 Wertanalyse

Die Wertanalyse (Value Analysis, Value Engineering) ist eine spezifische Methode des Value Managements<sup>59</sup>, welche ein systematisches sowie kreatives Vorgehen zur Steigerung des Werts eines Wertanalyse-Objekts<sup>60</sup> bereitstellt [DIN12973, S. 25], [VDI2800, S. 9], [DIN1325-1, S. 3]. Ziel ist es, die ökonomisch beste Lösung zu finden und somit eine Optimierung des Unternehmenswerts zu erreichen [Bur99, S. 182], [VDI11, S. 29]. In der industriellen Praxis findet die Wertanalyse zu 60 Prozent Einsatz zur Kostensenkung von bereits bestehenden Produkten [EKL07, S. 118]. Der **Wert** eines Analyseobjekts bezeichnet das Verhältnis vom Beitrag der Funktion<sup>61</sup> zur Bedürfnisbefriedigung des Nutzers zu den eingesetzten Ressourcen (bspw. Kosten zur Realisierung der Funktion) [DIN1325-1, S. 3]. Der Wert ist eine relative Größe und kann von verschiedenen Beteiligten in verschiedenen Situationen unterschiedlich bewertet werden [DIN12973, S. 12]. Auf Basis des Werts wird der Vergleich zweier Lösungen ermöglicht (Wertvergleich) [DIN12973, S. 15]. In Anlehnung an die DIN-Norm 12973 und die VDI-Richtlinie 2800 gliedert sich das Vorgehen bei der Wertanalyse in die vier Phasen Projektplanung, Analyse, Entwicklung sowie Realisierung (vgl. Bild 3-9) [DIN12973, S. 32ff.], [VDI2800, S. 20].

**Projektplanungsphase:** Zu Beginn der Wertanalyse gilt es zu klären, ob sich das ausgewählte Problem mit Hilfe der Methode sinnvoll bearbeiten lässt. Ist dies der Fall erfolgt

---

<sup>59</sup> Value Management hat die Maximierung der Gesamtleistung einer Organisation zum Ziel. Auf Führungsebene baut Value Management auf einer wertorientierten Organisationskultur auf und zielt auf eine Wertsteigerung für ihre Stakeholder ab. Auf operativer Ebene werden geeignete Methoden und Werkzeuge zur Wertsteigerung bereitgestellt [DIN1325-2, S. 4].

<sup>60</sup> Als Wertanalyse-Objekt wird das zu entwickelnde oder bereits existierende Produkt bezeichnet, welches Gegenstand der Wertanalyse ist [DIN1325-1, S. 4].

<sup>61</sup> In der Konstruktionsmethodik beschreiben Funktionen einen gewollten Zusammenhang zwischen Input und Output eines Systems zur Erfüllung einer spezifischen Aufgabe [PBF+07, S.44]. Im Rahmen der Wertanalyse beschreibt eine Funktion die Wirkung eines Produktes oder seiner Elemente. Es wird zwischen nutzerbezogenen (vom Nutzer erwartete Wirkung – Wofür?) und produktbezogenen (zur Realisierung der nutzerbezogenen Funktion notwendige – Wie?) Funktionen unterschieden [DIN1325-1, S. 4], [DIN129730, S. 39].

die Projektdefinition. Hierzu wird das Wertanalyse-Objekt, die Rahmenbedingungen (vorhandene Bedürfnisse, Trends etc.) sowie die Grobziele (Sach-, Kosten-, Termin- und Human-Ressources-Ziele) durch das Management festgelegt und eindeutig beschrieben. Um eine erfolgreiche Durchführung des Projekts sicherzustellen, wird die Projektorganisation geplant (Festlegung von Arbeitspaketen, benötigtes Fachwissen und Ressourcen sowie der Zeitplan) [VDI2800, S. 22ff.]. Das Wertanalyse-Team ist interdisziplinär und wird auf Basis ihrer Kompetenzen gemäß der VDI-Richtlinie 2807 zusammengestellt [DIN1325-1, S. 4], [VDI2807, S. 24ff.]. Ergebnis der Projektplanung ist das definierte Wertanalyse-Projekt.

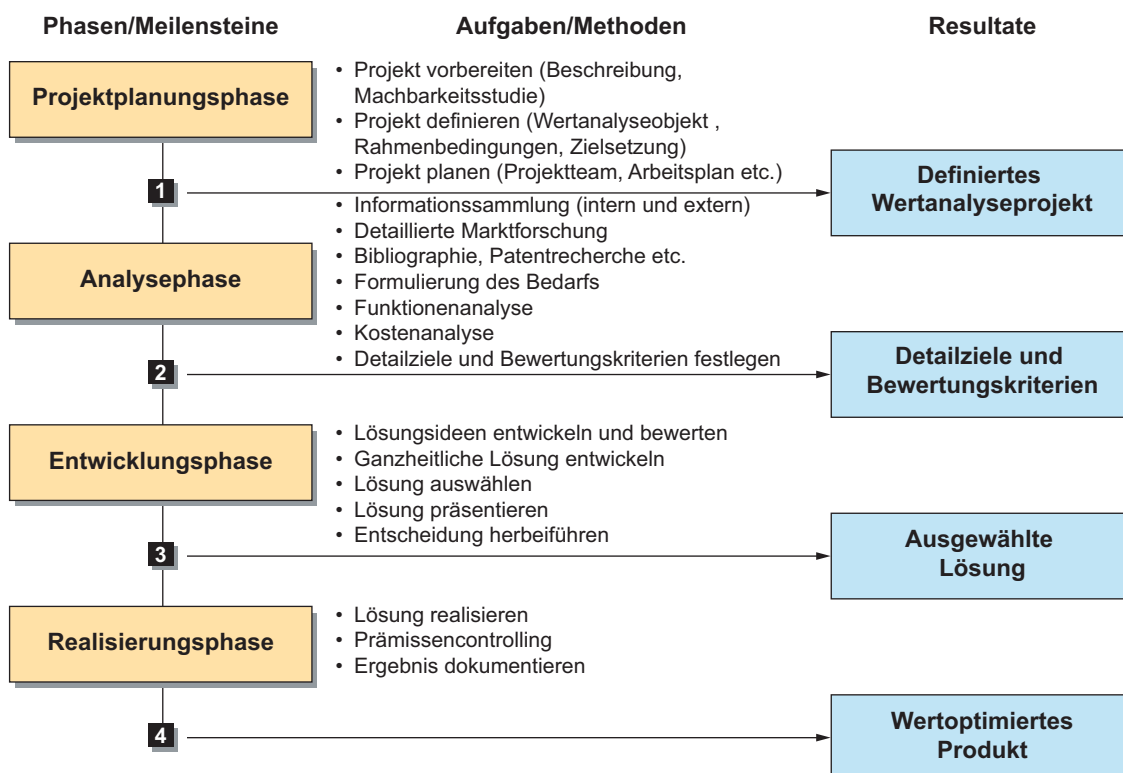


Bild 3-9: Vorgehen bei der Wertanalyse (Wertanalyse-Arbeitsplan) in Anlehnung an [DIN12973, S. 32ff.], [VDI2800, S. 20]

**Analysephase:** Im Rahmen der Analysephase wird zunächst die Ausgangssituation analysiert (z.B. durch Wettbewerbsanalyse, Trendanalyse, Patentrecherche, Marktforschung) und Kundenanforderungen/-bedürfnisse abgeleitet. Durch Abstraktion der Kundenbedürfnisse zu nutzerbezogenen Funktionen und Zuordnung zu produktbezogenen Funktionen wird der Lösungsraum vergrößert (Funktionenanalyse<sup>62</sup>) [VDI2800, S. 24]. Ihnen werden Funktionenkosten<sup>63</sup> in der Funktionenkosten-Matrix zugeordnet. Auf Basis der

<sup>62</sup> Vgl. [VDI2803] und [DIN16271].

<sup>63</sup> Funktionenkosten beschreiben die Summe der geplanten und angefallenen Aufwendungen, die zur Realisierung einer Funktion aufgebracht werden [DIN12973, S. 47].

Analyseergebnisse können Detailziele und Bewertungskriterien<sup>64</sup> festgelegt werden; sie sind das Ergebnis der zweiten Phase [VDI2800, S. 24].

**Entwicklungsphase:** Für die vorab definierten Funktionen werden in der Entwicklungsphase mit Hilfe von Kreativitätstechniken Lösungsideen entwickelt und hinsichtlich ihrer Zielerreichung analysiert und bewertet. Ausgewählte Teillösungen werden zu ganzheitlichen Lösungskonzepten zusammengefasst. Diese werden iterativ weiterentwickelt und bewertet und so zu einer Lösung konsolidiert. Die abschließende Auswahl, Bewertung und Dokumentation bildet den Abschluss des direkten Entwicklungsprozesses. Die Entscheidung über eine Realisierung der Lösung erfolgt anhand von nachvollziehbaren Kriterien [VDI2800, S. 26ff.].

**Realisierungsphase:** In der letzten Phase erfolgt die Umsetzung der Lösung in ein reales Produkt. Hierbei ist eine kontinuierliche Prämissenkontrolle notwendig und ggf. sind korrigierende Maßnahmen einzuleiten. Die Realisierungsphase schließt das Wertanalyse-Projekt ab; Ergebnis ist ein wertoptimiertes Produkt [VDI2800, S. 28].

### **Bewertung**

Die Wertanalyse wird durch ein interdisziplinäres Bewertungsteam durchgeführt und lässt sich bereits in der frühen Entwicklungsphase einsetzen. Wie beim Target Costing erfolgt die Bewertung der Kosten und des Nutzens auf Basis der Funktionen des Systems. Auf Basis der Ergebnisse lässt sich eine Entscheidung für die Weiterentwicklung einer Lösung treffen. Im Rahmen der Realisierungsphase wird auch während der weiteren Entwicklung kontinuierlich die Wirtschaftlichkeit überprüft.

### **3.3.3 Leitfaden für ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte nach ZIRKLER**

Der Leitfaden für ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement unterstützt die Entwickler bei der Konzeptfindung und -auswahl unter Kostengesichtspunkten im Systementwurf<sup>65</sup> mechatronischer Produkte. Der Leitfaden umfasst einen Zielkostenmanagement-Referenzprozess sowie Methoden und Hilfsmittel, welche eine frühzeitige, aussagekräftige Kostenplanung, -steuerung und -kontrolle ermöglichen [Zir10, S. 2 u. S. 85]. Bild 3-10 gibt einen Überblick über den Leitfaden, welcher die vierzehn Phasen zu fünf Hauptphasen zusammenfasst. Er basiert auf einem matrixbasiertem Ansatz für den Systementwurf

---

<sup>64</sup> Ein Bewertungskriterium ist ein Merkmal, welches die Bewertung einer erwarteten oder erbrachten Leistung eines Wertanalyse-Objekts ermöglicht. Für eine umfassende Spezifikation einer Funktion werden meist mehrere Bewertungskriterien benötigt [DIN16271, S. 14].

<sup>65</sup> Der im Leitfaden betrachtete Systementwurf beschreibt das Vorgehen von Anforderungen über die Funktions-, Komponenten- und Prozessstruktur hin zu disziplinübergreifenden Lösungskonzepten [Zir10, S. 85f.].



sowie deren Visualisierung durch Graphen [LMB09, S. 67ff.]. Die Design Structure Matrix (DSM) gehört zu den Intra-Domain Matrizen. Sie stellt gleiche Elemente in einer quadratischen Matrix gegenüber. Besteht eine Beziehung zwischen zwei Elementen, wird dies entsprechend mit einem Kreuz bzw. einer Eins in der Matrix vermerkt. Sollen Beziehungen zwischen Elementen aus verschiedenen Domänen abgebildet werden, erfolgt dies über eine Domain Mapping Matrix (DMM). Die DMM gehört zu den Inter-Domain Matrizen [LMB09, S. 87ff.], [Zir10, S. 38ff.]. Auf Basis der Matrizen lassen sich verschiedene Analysen, bspw. Strukturanalysen, realisieren [LMB09, S. 87ff.]. Einen Überblick über die eingesetzten Matrizen im Rahmen des Leitfadens und die zugehörigen Elemente gibt Bild 3-11.

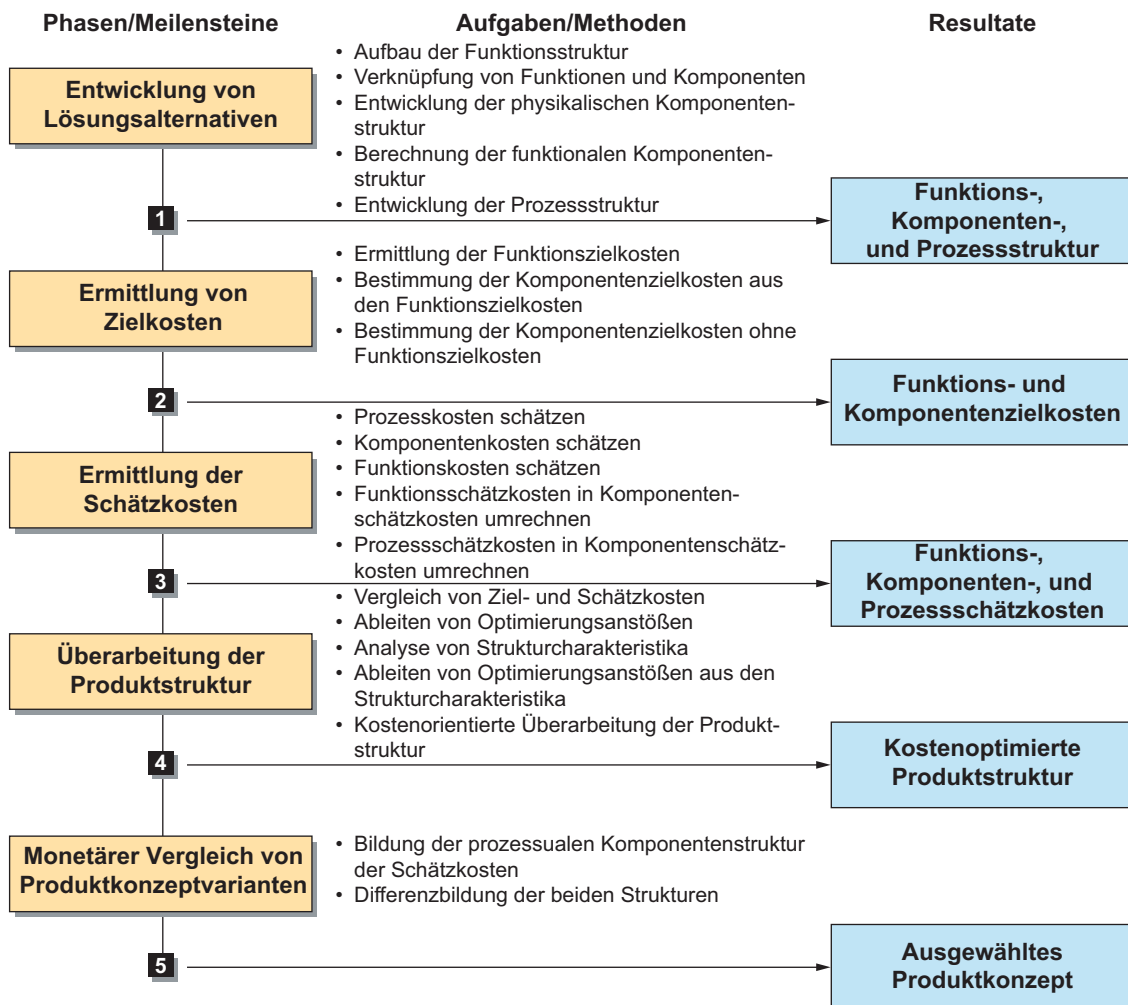


Bild 3-10: Leitfaden für ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement in Anlehnung an ZIRKLER [Zir10, S. 181ff.]

**Entwicklung von Produktkonzepten:** Zur Entwicklung von Produktkonzepten wird im ersten Schritt eine Funktionshierarchie aufgebaut und die Funktionen in der  $DSM_{F(F)}$  der Funktionsstruktur abgebildet. Darauf aufbauend werden geeignete Wirkprinzipien zur Erfüllung der Funktionen kombiniert. Die Komponenten werden in der  $DMM_{F-K}$  mit den Funktionen verknüpft und die physikalische Komponentenstruktur durch Abbildung der

Wirkbeziehungen zwischen den Komponenten in der  $DSM_{K(K)}$  abgebildet. Durch eine Matrixmultiplikation  $DMM_{F-K}$  mit der transponierten  $DMM_{F-K}^T$  ergibt sich die funktionale Komponentenstruktur  $DSM_{K(F)}$ . Zur Umsetzung des Produktkonzepts werden abschließend für jeden Unternehmensbereich (bspw. Entwicklung und Konstruktion) den Komponenten Prozessschritte zugewiesen. Die Verknüpfung der Komponenten mit den Prozessschritten erfolgt in der  $DMM_{K-P}$ . Ergebnis der Phase ist die Funktions-, Komponenten- und Prozessstruktur für verschiedene Produktkonzepte [Zir10, S. 92ff. u. S. 181ff.].

**Ermittlung der Zielkosten:** Zur Ermittlung der Zielkosten werden die Teilfunktionen gemäß ihrer Kundenrelevanz gewichtet. Durch Multiplikation der Gewichtungsfaktoren mit den Gesamtzielkosten ergeben sich die Funktionszielkosten. Diese werden in einer Diagonalmatrix  $\text{diag } \vec{f}_z$  abgebildet. Im nächsten Schritt werden die Komponenten hinsichtlich ihres Beitrags zur Erfüllung einer Teilfunktion gewichtet ( $DSM_{F-Kg}$ ). Durch Matrixmultiplikation der transponierten  $DSM_{F-Kg}^T$  mit dem Produkt aus Diagonalmatrix  $\text{diag } \vec{f}_z$  und  $DSM_{F-Kg}$  ergeben sich die Komponentenzielkosten ( $DSM_{K(F)z}$ ). Die Komponentenzielkosten ohne Funktionszielkosten ergeben sich aus der Gewichtung der Komponenten- und den Gesamtzielkosten ( $\text{diag } \vec{k}_z$ ) [Zir10, S. 185ff.].

	Funktionen (F/f)	Komponenten (K/k)	Prozesse (P/p)	Ressourcen (R/r)
Funktionen	$DSM_{F(F)}; \text{diag } \vec{f}_z; \text{diag } \vec{f}_s$	$DMM_{F-K}; DMM_{F-Kg}$		
Komponenten		$DSM_{K(K)}; DSM_{K(F)}; DSM_{K(F)z}; \text{diag } \vec{k}_z;$ $\text{diag } \vec{k}_s; DSM_{K(F)s}; DSM_{K(P)s}; DSM_{K(K)z}$	$DMM_{K-P}; DMM_{K-Pg}$	
Prozesse			$\text{diag } \vec{p}_s$	$DMM_{P-Rs}$
Ressourcen				$\text{diag } \vec{r}$

DSM: Design Structure Matrix; DMM: Domain Mapping Matrix; diag: Diagonalmatrix

Bild 3-11: Matrixbasierter Ansatz in Anlehnung an ZIRKLER [BBL08, S. 318], [Zir10, S. 181ff.]

**Ermittlung der Schätzkosten:** Zur Ermittlung der Schätzkosten liefert der Leitfaden eine Sammlung ergebnisorientierter Kurzkalkulationsverfahren [Zir10, S. 118ff.]. Eine Kostenschätzung ist generell nur erfolgreich, wenn auf Daten von Vorgängerprojekten zurückgegriffen werden kann. Im ersten Schritt werden die Prozesskosten geschätzt. Hierzu werden die Ressourcen den Prozessschritten ( $DMM_{P-Rs}$ ) zugeordnet und die Kostensätze für die Ressourcen ermittelt ( $\text{diag } \vec{r}$ ). Durch Matrixmultiplikation der beiden Ergebnisse resultieren die Prozesskosten ( $\text{diag } \vec{p}_s$ ). Die Komponenten- und die Funktionskosten werden mit Hilfe der Kurzkalkulationsverfahren geschätzt und in den Diagonalmatrizen  $\text{diag } \vec{k}_s$  und  $\text{diag } \vec{f}_s$  abgebildet. Im nächsten Schritt werden die Funktionsschätzkosten durch Matrixmultiplikation der transponierten  $DMM_{F-Kg}^T$  mit dem Produkt der Diagonalmatrix  $\text{diag } \vec{k}_s$  und der gewichteten  $DMM_{F-Kg}$  in Komponentenschätzkosten ( $DSM_{K(F)s}$ ) umgerechnet. Abschließend erfolgt nach dem gleichen Schema die

Umrechnung von Prozessschätzkosten in Komponentenschätzkosten ( $DSM_{K(P)s}$ ). Ergebnis der Phase sind die Schätzkosten für die Funktionen, Komponenten sowie Prozesse [Zir10, S. 188ff.].

**Überarbeitung der Produktstruktur:** Auf Basis eines Vergleichs der Ziel- und Schätzkosten lassen sich Anstöße zur Optimierung der Produktstruktur ermitteln (bspw. Hinweise zur Reduzierung von Schnittstellenkosten). Gleiches gilt für die Analyse der Strukturcharakteristika anhand der Graphen der funktionalen und physikalischen Komponentenstruktur. Auf Basis der Optimierungsanstöße wird die Produktstruktur überarbeitet. Ergebnis sind kostenoptimierte Produktstrukturen [Zir10, S. 188ff.].

**Monetärer Vergleich von Produktkonzeptvarianten:** Für den Vergleich wird die monetäre Differenz zwischen den Konzeptalternativen berechnet und die Konzeptalternative mit den geringeren Schätzkosten ausgewählt [Zir10, S. 196].

### **Bewertung**

Der Leitfaden basiert auf einem matrixbasierten Entwurf, liefert einen interdisziplinären Ansatz und eignet sich für Anpassungsentwicklungen. Die Ermittlung der Kosten erfolgt zum einen wie beim Target Costing und zum anderen zur Überprüfung des Konzepts auf Basis von Schätzkosten. Hierfür sind detaillierte Kosteninformationen des Vorgängerprodukts notwendig. Die Bewertung beschränkt sich auf die Selbstkosten des mechatronischen Systems. Durch die Abbildung der Kosten und ihrer Abhängigkeiten in Form von Matrizen wird das Verständnis bei den Entwicklern unterstützt. Die Kundenorientierung erfolgt lediglich über die Präferenzen der Kunden für einzelne Funktionen des Systems.

### **3.3.4 Verfahren für die Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien nach BRINK**

Ziel des Verfahrens nach BRINK ist die Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien für neue Innovationsaufgaben mechatronischer Gebrauchsgüter. Der Fokus liegt hierbei in Anlehnung an DESCHAMPS, NAYAK und LITTLE auf der Planung in der Schnittstelle zwischen Markt, Technologie und Wettbewerb [DNL96, S. 134]. Das Vorgehen ist in sieben Phasen gegliedert, wie Bild 3-12 darstellt. Eine werkzeugtechnische Unterstützung ist durch die am Heinz Nixdorf Institut entstandene Innovations-Datenbank gegeben [Bri10, S. 97f.].

**Analyse und Prognose des Geschäfts:** Ziel ist die Antizipation von Chancen, die aus der Entwicklung von Markt und Umfeld resultieren. Hierzu wird die Geschäftsstruktur analysiert, die Kunden segmentiert und auf dieser Basis das zukünftige Geschäft prognostiziert. Ergebnis sind zukünftige Anforderungen und Potentiale für bestehende Produkte. Für die identifizierten Produktbereiche werden Norm-Produkt- und Norm-Technologiestrategien entwickelt und die entsprechende Innovationsaufgabe je Bereich in Form eines Steckbriefs sowie einer Anforderungsliste abgeleitet [Bri10, S. 99ff.].

**Entwicklung von kundenspezifischen Anforderungsprofilen:** Mittels Kundenbefragung werden die Prioritäten für die Produktanforderungen je Kundensegment ermittelt. Analog zur Erfolgsfaktoren-Analyse (vgl. [GP14, S. 139f.]) werden kundensegmentspezifische Anforderungsprofile gebildet [Bri10, S. 117ff.].

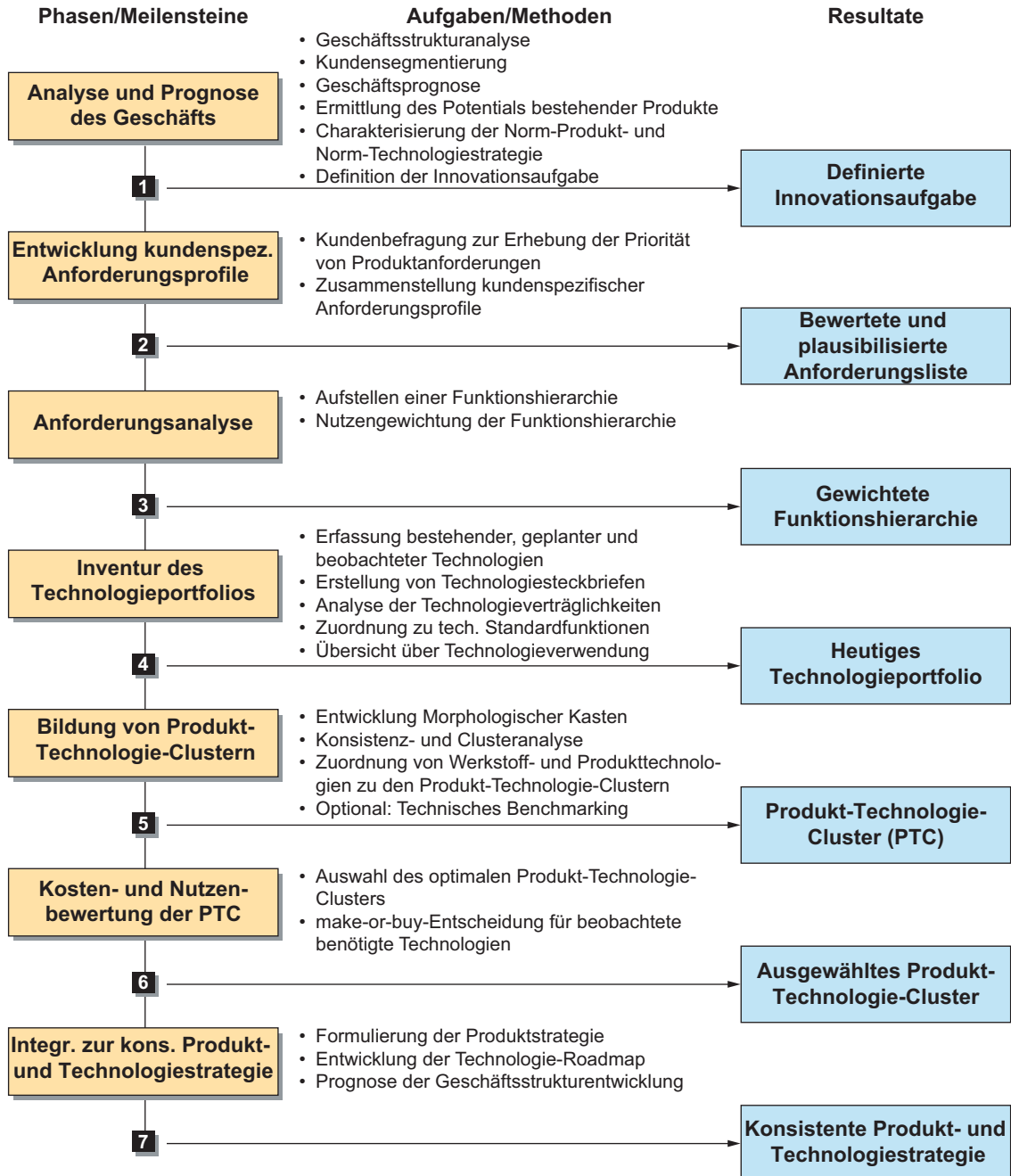


Bild 3-12: Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien nach BRINK [Bri10, S. 98]

**Anforderungsanalyse:** Aus den funktionalen Anforderungen wird eine Funktionshierarchie abgeleitet. Auf Basis der kundenspezifischen Anforderungsprofile erfolgt in Anlehnung an das Target Costing (vgl. Abschnitt 3.3.1) eine Nutzengewichtung der Teilfunktionen [Bri10, S. 122ff.].

**Inventur des Technologieportfolios:** Die bestehenden, geplanten und beobachteten Technologien werden in Steckbriefen beschrieben, paarweise auf Verträglichkeit bewertet und somit substituierende, konfliktäre und neutrale Wechselwirkungen im Technologieportfolio aufgezeigt. Den Technologien werden Standardfunktionen zugeordnet und ein Überblick über die derzeitige Technologieverwendung gegeben; die derzeitige Technologiestrategie wird transparent [Bri10, S. 131ff.].

**Bildung von Produkt-Technologie-Clustern:** In dieser Phase werden konsistente Produkt-Technologie-Cluster systematisch und softwareunterstützt im morphologischen Kasten gebildet und so die Innovationsaufgabe konkretisiert [Bri10, S. 136].

**Kosten- und Nutzenbewertung von Produkt- und Technologie-Clustern:** Die in der vorherigen Phase entwickelten Produkt- und Technologie-Cluster werden zunächst hinsichtlich ihrer Anforderungserfüllung überprüft und so ihr Nutzen für die Kundensegmente bewertet. Mit Hilfe einer Kostenbewertungsmatrix werden die Kosten-Nutzen-Kongruenz sowie das kostengünstigste Produkt-Technologie-Cluster ermittelt. Im Zielkostenkontrolldiagramm werden der Kosten- und Nutzenanteil einer Technologiekombination gegenüber gestellt und so kostentreibende und kostensenkende Kombinationen identifiziert. Im Anschluss erfolgt eine make-or-buy-Entscheidung für die benötigten Technologien [Bri10, S. 146ff.].

**Integration zur konsistenten Produkt- und Technologie-Strategie:** Abschließend wird die Produktstrategie formuliert, eine Technologie-Roadmap abgeleitet und darauf basierend eine Prognose über die Geschäftsstrukturentwicklung erstellt [Bri10, S. 154ff.].

### **Bewertung**

Das Verfahren unterstützt die Analyse heutiger und zukünftiger Kundenanforderungen sowie die Bildung konsistenter Produkt- und Technologie-Cluster. Es kann somit im Rahmen der Konzipierung eingesetzt werden. Die Kosten des Systems werden mittels Target Costing berücksichtigt und dem Kundennutzen gegenübergestellt sowie ein Entwicklungsrahmen bereitgestellt. Zudem wird eine Prognose über die Entwicklung der Geschäftsstruktur durchgeführt. Das Verfahren liefert somit eine Entscheidungsgrundlage.

### **3.3.5 Kostengliederungsstruktur (Cost Breakdown Structure)**

Die Kostengliederungsstruktur (CBS) bildet die Kostenelemente eines Produkts oder Systems über dessen Lebenszyklus als Hierarchie ab. Bild 3-13 zeigt einen Ausschnitt aus einer allgemeinen CBS. Das Modell verknüpft Ziele und Aktivitäten mit Ressourcen und stellt eine logische Unterteilung der Kosten hinsichtlich Funktionsbereichen, Elementen

des Systems und/oder hinsichtlich Ähnlichkeit dar. Die Struktur ist für jedes Produkt/System spezifisch anzupassen. Dabei sind die folgenden fünf Anforderungen einzuhalten [Bla78, S. 32ff.], [BF91, S. 28]:

- 1) Es ist sicherzustellen, dass alle Lebenszykluskosten identifiziert und in der CBS berücksichtigt wurden.
- 2) Kostenkategorien lassen sich meist einer Aktivität oder einem Material zuordnen. Sie sind so zu definieren, dass sie von allen Beteiligten einheitlich verstanden werden und nachvollziehbar ist, welche Kosten unter die Kategorien fallen.
- 3) Die Kosten sind so herunter zu brechen, dass sie in den einzelnen Phasen, wie Systementwurf, Entwicklung, Produktion etc., Kostentransparenz für das Management bieten. Auf Basis der Struktur soll das Management in der Lage sein, Kostentreiber und Abhängigkeiten zu identifizieren.
- 4) Die Kostenstruktur ist so aufzubauen und die Kostenkategorien so zu benennen, dass sie den Gliedern der Wertschöpfungskette (Hersteller, Lieferant, Kunde etc.) eindeutig zugewiesen werden können.
- 5) Die Kostenkategorien sind so zu benennen (z.B. über Nummerierungen, Indizes), dass sie innerhalb der gesamten Dokumentation des Entwicklungsprojekts einheitlich verwendet werden.

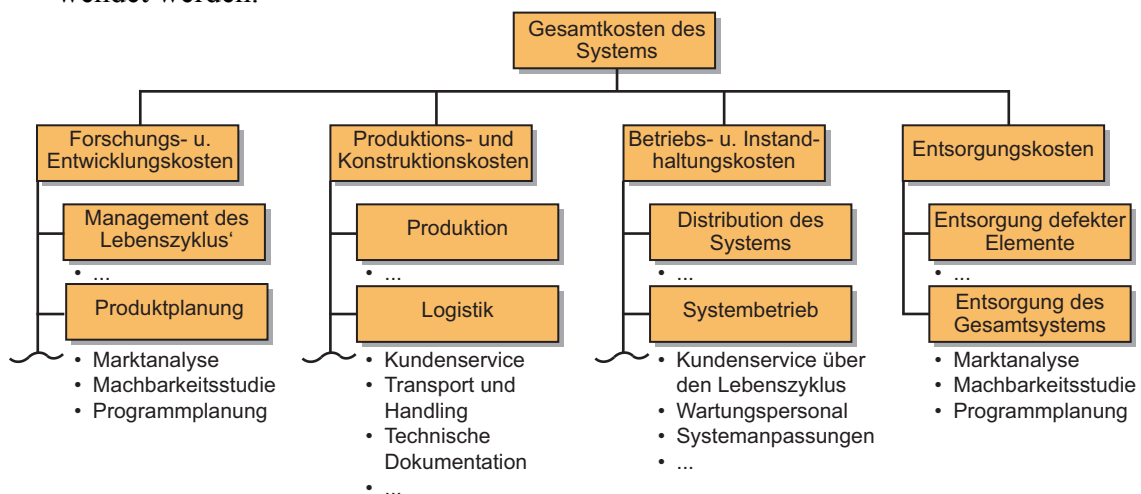


Bild 3-13: Allgemeine Kostengliederungsstruktur (Ausschnitt) nach BLANCHARD [Bla78, S. 32 u. S. 192]

## Bewertung

Die Kostengliederungsstruktur ermöglicht ein einheitliches Verständnis der Kosten des Systems über den Lebenszyklus. Die Darstellung erfolgt mit Hilfe eines Modells zu dessen Erstellung Richtlinien zur Unterstützung der Entwickler bereitgestellt werden. Es liefert somit eine Entscheidungsgrundlage auf Basis der Kosten über den Lebenszyklus und

stellt einen kostenorientierten Entwicklungsrahmen bereit. Dabei werden die Abhängigkeiten der Kosten mittels der hierarchischen Struktur berücksichtigt.

### 3.3.6 Ansätze zur Analyse der Lebenszykluskosten

Die Lebenszykluskostenanalyse, auch Lebenszykluskostenrechnung genannt, wurde erstmals durch das amerikanische Verteidigungsministerium eingesetzt. Seitdem wurden die Ansätze zur Analyse der Lebenszykluskosten kontinuierlich weiterentwickelt. Für einen Überblick über die verschiedenen Ansätze sei auf ASIEDU und GU verwiesen [AG98, S. 883ff.]. Im Folgenden wird exemplarisch der Ansatz nach BLANCHARD vorgestellt [Bla78, S. 71ff.], [Bla08, S. 419ff.]. Das beschriebene Vorgehen findet sich u.a. bei DHILLON oder in der DIN-Norm 60300 wieder [Dhi89, S. 34], [DIN60300, S. 17ff.].

Ziel der Analyse der Lebenszykluskosten ist die Ermittlung und Bewertung der Kosten, die ein System/Konzept über seinen Lebenszyklus verursacht, um auf dieser Basis eine ökonomische Entscheidung für eine Alternative treffen zu können [Bla08, S. 419]. Die Analyse hat dabei vier Funktionen zu erfüllen: Abbildungs-, Prognose-, Erklärungs- und Gestaltungsfunktion [Sch08, S. 258f.]. Die Analyse erfolgt in zwölf Schritten, welche in Bild 3-14 zu vier Phasen zusammengefasst wurden und im Folgenden beschrieben werden.

**Ermittlung der Lebenszykluskosten:** Im ersten Schritt werden die Anforderungen an das System definiert. Dies beinhaltet eine Funktionsanalyse sowie die Definition von Leistungsparametern und der Nutzungsdauer für das System. Auf Basis der Anforderungen wird der Lebenszyklus des betrachteten Systems beschrieben und für jede Phase des Lebenszyklus relevante Prozesse identifiziert. Diese Prozesse werden wie in Abschnitt 3.3.5 dargestellt in einer (Lebenszyklus-)Kostengliederungsstruktur abgebildet [Bla08, S. 421ff.].

**Bewertung der Lebenszykluskosten:** Für jedes Element der Kostengliederungsstruktur werden die Kosten für jedes Jahr des Lebenszyklus<sup>66</sup> abgeschätzt. Hierzu werden u.a. Methoden zur Kostenschätzung oder die Prozesskostenrechnung<sup>66</sup> eingesetzt. Im nächsten Schritt wird ein Modell ausgewählt und rechnerintern abgebildet, welches die Beteiligten beim Analyseprozess unterstützt. Mit Hilfe des Modells und der Schätzverfahren wird für jedes Element ein Kostenprofil erstellt. Hierbei können bspw. die Regressionsanalyse oder Neuronale Netze eingesetzt (vgl. [SPJ+02, S. 548ff.]) und Faktoren wie Inflation berücksichtigt werden [Bla08, S. 426ff.].

**Identifikation von Kostentreibern:** Zur Identifikation der Kostentreiber wird zunächst eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Kostenprofilen erstellt. Auf dieser Basis lassen sich Elemente in der Kostengliederungsstruktur identifizieren, welche einen hohen

---

<sup>66</sup> Zur entwicklungsbegleitenden Prozesskostenprognose liefern u.a. FISCHER ET AL. einen Ansatz zur Bereitstellung von Kosteninformationen [FKH+94, S. 473].

Anteil an den Kosten aufweisen. Im nächsten Schritt werden die Ursachen für die hohen Kosten sowie die Wirkbeziehungen der Kosten ermittelt. Hierbei kann bspw. das Ishikawa-Diagramm unterstützen. Da die Bewertung der Kosten unter Unsicherheit erfolgt, wird eine Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse durchgeführt und potentiell kritische Elemente identifiziert. Diese werden mit Hilfe einer Paretoanalyse hinsichtlich ihrer Priorität bewertet. Ergebnis sind priorisierte, kritische Kostentreiber [Bla08, S. 434ff.].

**Auswahl einer Lösungsalternative:** Die Ergebnisse der vorangegangenen Phase liefern einen Überblick hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit der Lösungsalternativen bezüglich der Lebenszykluskosten. Auf dieser Basis werden vorteilhafte Alternativen ausgewählt. Um das Risiko der Unsicherheit zu minimieren, wird für diese Alternativen erneut eine Sensitivitätsanalyse sowie eine Break-Even-Analyse durchgeführt. Abschließend wird eine Alternative ausgewählt [Bla08, S. 436ff.].

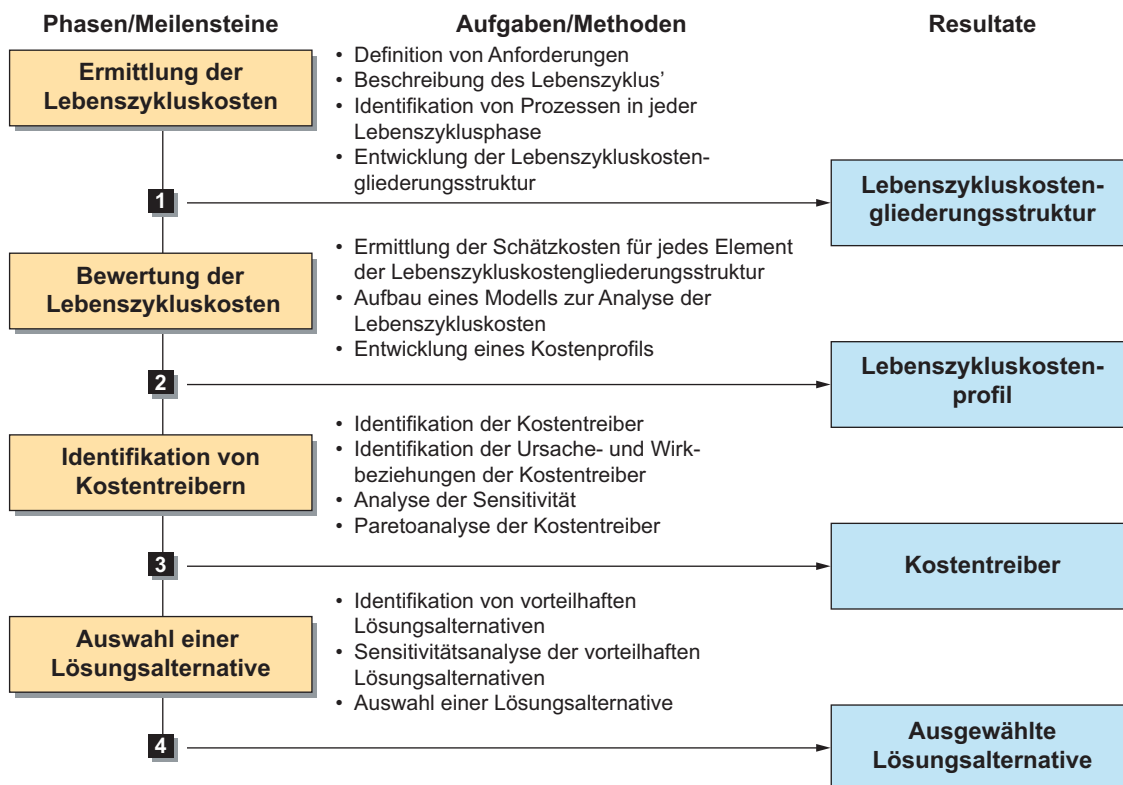


Bild 3-14: Vorgehen bei der Analyse der Lebenszykluskosten in Anlehnung an BLANCHARD [Bla08, S. 205 u. S. 419ff.]

Das beschriebene Vorgehen kann in den Phasen des Lebenszyklus' kontinuierlich wiederholt werden, wie [BF11, S. 572] zeigen. EMBLEMSVÄG legt mit seinem Ansatz zur prozessbasierten Lebenszykluskostenrechnung den Fokus auf die Prozesse und zugehörigen Ressourcen, welche in den Lebenszyklusphasen durch das System durchlaufen werden. Zudem nutzt er die Monte-Carlo-Simulation, um die Aussagegüte zu steigern. In jedem Schritt der Analyse wird zudem die kontinuierliche Verbesserung der gefundenen Lösung fokussiert [Emb03, S. 151ff.]. Hierbei können u.a. die *Regeln zum Senken der Lebenslaufkosten* nach EHRENSPIEL ET AL. Anwendung finden [EKL07, S. 134].



## Bewertung

Die Lebenszykluskostenanalyse ermöglicht die Analyse und Bewertung der Kosten über den Lebenszyklus und kann bereits im Rahmen der Konzipierung Einsatz finden. Die Analyse greift zur Darstellung der Kosten auf die Kostengliederungsstruktur zurück. Somit wird ein einheitliches Verständnis geschaffen. Die Lebenszykluskostenanalyse liefert somit ebenfalls eine Entscheidungsgrundlage und einen Entwicklungsrahmen auf Basis der Lebenszykluskosten. Eine Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse erfolgt durch die Aufnahme von Anforderungen.

### 3.3.7 Ansätze zur kostenbasierten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ist ein systematisches, induktives Analyseverfahren zur Identifikation und Bewertung von potentiellen Fehlern sowie zur Reduktion von Risiken basierend auf einer Verknüpfung von Fehlerursachen und -folgen [KI00, S. 1], [DIN60812, S. 31]. Sie ist bereits frühzeitig in der Entwicklung einzusetzen, um Fehler vor ihrer Entstehung kostengünstig zu beheben. Die FMEA begleitet den Entwicklungsprozess iterativ und kann auch außerhalb der konstruktiven Entwurfsarbeit bspw. für die Analyse von Prozessen oder Dienstleistungen eingesetzt werden [DIN60812, S. 6f.], [Wan11, S. 1], [PBF+07, S. 702f.]. Das prinzipielle Vorgehen bei der FMEA lässt sich nach PAHL/BEITZ in vier Phasen gliedern (vgl. Bild 3-15). Ausgangspunkt ist das definierte System sowie seine Zerlegungsstufen [DIN60812, S. 6f.]. Für eine Anwendung im Rahmen der Konzipierung eignet sich als Ausgangspunkt die Prinzipiellösung des Systems, insbesondere die Wirkstruktur (vgl. Abschnitt 2.5.6) [GKP09, S. 1111ff.]. Die Ergebnisse der FMEA werden durchgängig mittels eines Formblatts<sup>67</sup> dokumentiert [PBF+07, S. 704].

**Analyse des Risikos:** Die Risikoanalyse beginnt mit den Systemelementen auf der untersten Ebene und endet auf der Gesamtsystemebene [DIN60812, S. 10f.]. Es werden zunächst potentielle Fehler für ein Systemelement angenommen sowie Ort und Art des Fehlers kurz beschrieben. Anschließend werden Auswirkung und Ursache des Fehlers bestimmt [PBF+07, S. 703f.], [DIN60812, S. 13ff.]. Checklisten und Fehlertaxonomien, bspw. nach FENELON ET AL., unterstützen die Identifikation [FMN+94, S. 24].

**Bewertung des Risikos:** Die Risikobewertung erfolgt anhand der drei Faktoren Wahrscheinlichkeit des Auftretens (Skala: 1 niedrig bis 10 hoch), der Auswirkung bzw. Schwere (Skala: 1 niedrig bis 10 hoch) sowie der Wahrscheinlichkeit der Entdeckung (Skala: 1 hoch bis 10 niedrig) eines Fehlers [PBF+07, S. 703f.], [DIN60812, S. 18f.], [KI00, S. 2f.].

---

<sup>67</sup> Die DIN-Norm 60812 beschreibt den Aufbau des Formblatts [DIN60812, S. 33ff.].

Der Bewertungsmaßstab wird meist system- und branchenabhängig gewählt. Häufig werden hierbei die Bewertungsmaßstäbe der AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG) als Grundlage verwendet [Aut08], [DIN60812, S. 25ff.], [KI00, S. 2f.].

**Bestimmung der Risikopriorität:** Das Produkt der drei zuvor bewerteten Faktoren ergibt die Risikoprioritätszahl (RPN) [DIN60812, S. 18], [KI00, S. 2]. Für die RPN ergibt sich aus den einzelnen Bewertungsspektren ein Wertebereich von 1 bis 1000. Eine RPN größer als 125 deutet auf einen kritischen Fehler hin [PBF+07, S. 703]. Da die RPN ordinalskaliert ist, kann eine Rangfolge gebildet, jedoch mangels Distanzfunktion keine Distanz zwischen den Werten berechnet werden [RI04, S. 179f.]. Weiterentwicklungen, wie die Fehlerzustands-, -auswirkungs-, und -kritizitätsanalyse (FMECA), versuchen daher diese Unzulänglichkeit zu beheben. Kritische Fehler werden bei der FMECA auf Basis der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schwere in der Kritizitätsmatrix ausgewählt [DIN60812, S. 20ff.].

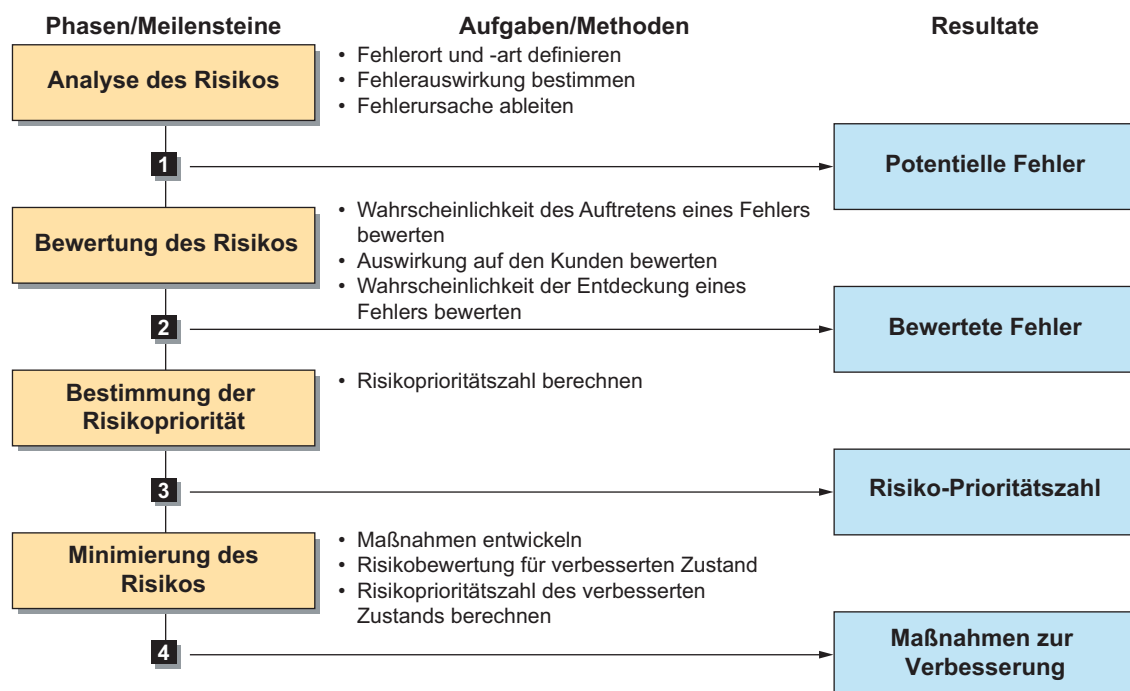


Bild 3-15: Vorgehen bei der FMEA in Anlehnung an [PBF+07, S. 703f.], [Ech14, S. 83]

**Minimierung des Risikos:** Abschließend werden Maßnahmen zur Verbesserung des Systems empfohlen und umgesetzt. Für durchgeführte Maßnahmen lässt sich nachfolgend analog zu Phase Zwei eine neue RPN bestimmen. Gegebenenfalls sind weitere Maßnahmen zu definieren bis die RPN nicht mehr im kritischen Bereich ist [PBF+07, S. 703].

Die klassische FMEA betrachtet üblicherweise die Ausfallarten unabhängig voneinander; häufig besteht jedoch eine Abhängigkeit von Fehlern, da sie bspw. dieselbe Fehlerursache

(Common Cause<sup>68</sup>) haben [DIN60812, S. 7]. Aus diesem Grund wird die FMEA meist in Kombination mit einem deduktiven Verfahren, wie der Fault Tree Analysis (FTA) verwendet [DIN60812, S. 31], [DIN61025, S. 1ff.]. DOROCIĄK kombiniert die FMEA auf Basis der Prinziplösung [GKP09, S. 1011ff.] mit der frühzeitigen FTA [Gau10, S. 103ff.], [DGK+09, S. 59ff.] – ergänzt um Bayessche Netze [Dor12, S. 1ff.] – zur frühzeitigen probabilistischen Analyse der Verlässlichkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme auf Basis der Prinziplösung [DG14, S.38ff.]. Die szenariobasierte FMEA nach KMENTA/ISHII werden dieser Tatsache gerecht, indem sie Fehlerszenarien über den Produktlebenszyklus betrachten [KI00, S. 4ff.].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit besonders interessant sind die kostenorientierten Weiterentwicklungen der FMEA, welche die Abschätzung von Fehlerkosten berücksichtigen. KMENTA/ISHII zeigen, dass eine Priorisierung von Fehlern auf Basis der erwarteten Kosten (Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Fehlerkosten) vorteilhaft ist, da Fehler bei gleicher RPN unterschiedliche Fehlerkosten verursachen (Life cost-based FMEA) [KI00, S. 5ff.]. RHEE/ISHII ergänzt die **Life-cost-based FMEA** um ein Formblatt, welches Personal-, Material- und Opportunitätskosten für die identifizierten Fehler berücksichtigt. Diese Personal- und Opportunitätskosten sind abhängig von Entdeckungs-, Reparatur-, Warte- sowie Anlaufzeiten und somit ebenfalls zu bewerten. Eine Sensitivitätsanalyse dieser Faktoren mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation unterstützt bei der Identifikation von Kostentreibern [RI02, S. 3f.], [RI04, S. 181f.]. Weitere Ansätze zur kostenbasierten FMEA liefern u.a. [SR03], [Wan11] und [HDS+08].

#### **Bewertung:**

Die klassische FMEA liefert einen Ansatz zur Identifikation von Fehlern, die über den Lebenszyklus im System auftreten können. Die kostenbasierten Analysen unterstützen zudem bei der Bewertung der aus den Fehlern resultierenden Kosten über den Lebenszyklus und liefern somit eine verlässlichkeitsorientierte Entscheidungsgrundlage und einen Entwicklungsrahmen. Einen Einsatz im Rahmen der Konzipierung wird auf Basis der Prinziplösung, insbesondere der Wirkstruktur ermöglicht und somit ein einheitliches Verständnis unterstützt.

### **3.4 Ansätze zur Analyse des Systemverhaltens Intelligenter Technischer Systeme in der Konzipierung**

Die Analyse des Systemverhaltens erfolgt im Rahmen der Entwicklungsmethodik für Intelligente Technische Systeme (vgl. Abschnitt 2.5.6) im disziplinspezifischen Entwurf. Beispielsweise stellen KEBLER ET AL. einen Ansatz zur Erstellung von Prozessmodellen für den Entwurf selbstoptimierender Regelungen vor, welcher bereits im Rahmen der Konzipierung die notwendigen Informationen für das Modell ausarbeitet. Voraussetzung

---

<sup>68</sup> *Common Cause* bezeichnet Ausfälle verschiedener Systemelemente aufgrund derselben unmittelbaren Ursache, wobei diese Ausfälle nicht voneinander abhängen [DIN13306, S. 17].

für die Erstellung der Prozessmodelle ist dabei ein vorhandenes, valides Dynamikmodell der Regelstrecke [KKT+13, S. 5ff.]. Dieses Modell liegt im Rahmen der Konzipierung insbesondere für Neuentwicklungen nicht vor. Eine Möglichkeit die Dynamik eines Systems und somit sein Verhalten abzubilden liefert der Ansatz System Dynamics (vgl. Abschnitt 3.4.1). Das Verhalten Intelligenter Technischer Systeme wird durch den Selbstoptimierungsprozess geprägt (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Methode zur Zielabhängigkeitsanalyse nach DUMITRESCU in Abschnitt 3.4.2 analysiert die Abhängigkeiten der äußeren Einflüsse auf die Ziele des Systems. Mittels der Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme nach POOK in Abschnitt 3.4.3 lassen sich Ursache-Wirkbeziehungen von Zielkonflikten beschreiben. Eine situationsabhängige Anpassung der Zielgewichtung zeigt das Verfahren zur situationsspezifischen Bestimmung und Gewichtung von Entwicklungsprozesszielen nach KAHL in Abschnitt 3.4.4 auf.

### 3.4.1 System Dynamics

System Dynamics wurde in den 1950er Jahren durch FORRESTER an der *Sloan School of Management* des *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* entwickelt [KFG02, S. 42]. Die Methode findet in verschiedenen Bereichen wie Management, Ökologie und Volkswirtschaft Einsatz (vgl. u.a. [For69], [For73], [SG08]) [KFG02, S. 42]. Grundgedanke ist, dass der Mensch nicht in der Lage ist, komplexe Zusammenhänge bspw. von soziotechnischen Systemen zu verstehen [For72, S. 74ff.], [Epp79, S. 56]. Systems Dynamics beschreibt somit eine Art zu Denken (Systemdenken). Es ist Teil des Systems Engineerings [Hit07, S. 65ff.]. Der Ansatz stellt eine graphische Sprache zur Verfügung, mit deren Hilfe sich die Struktur von Systemen sowie das dynamische Verhalten von Systemen abbilden lassen. Insbesondere können Rückkoppelungen in Form von stabilisierenden bzw. verstärkenden Schleifen darstellt sowie das Verhalten des Systems quantitativ erfasst und simuliert werden [For72, S. 14ff.], [HFW+12, S. 55]. Der Aufbau einer Systemstruktur im System Dynamics kann als Hierarchie aufgefasst werden [For72, S. 106]. Auf oberster Ebene befindet sich die definierte geschlossene Systemgrenze. Dabei ist ein System gemeint, welches sein Verhalten innerhalb seiner internen Struktur realisiert [For72, S. 106]. Darunter ist der Regelkreis als das Strukturelement des Systems angeordnet. Der Regelkreis verbindet die Entscheidung, die Aktion und den Zustand des Systems. Als Ergebnis werden Informationen über den Systemzustand zum Entscheidungspunkt zurückgegeben (vgl. Bild 3-16).

Zustands- und Flussgrößen bilden die Substruktur des Regelkreises. Die Zustandsgrößen integrieren die Ergebnisse der Aktionen im System und lassen sich nur durch Flussraten über den Zeitverlauf verändern [For72, S. 92ff.]. Auf der untersten Ebene bilden Ziele, Zustände, Abweichungen und Aktionen die Substruktur der Aktionsvariablen. Eine Ratengleichung oder auch Entscheidungsregel führt auf Basis der Abweichung eines beobachteten Zustands zu einem Ziel, zu einer bestimmten Aktion im System [For72, S. 101ff.]. Die Gleichungen lassen sich u.a. mathematisch oder kausal abbilden und bspw. rechnerbasiert berechnen. Auf dieser Basis lässt sich das Systemverhalten über die Zeit

berechnen [For72, S. 107ff.]. GROESSNER und SCHAFFERNICHT haben verschiedene Studien mit System Dynamics untersucht und geben einen Überblick über die eingesetzten Beschreibungsarten der Abhängigkeiten [GS12, S. 49ff.]. Nach COYLE lässt sich der System Dynamics Ansatz in fünf Phasen durchführen. Erstens wird das Problem definiert, zweitens wird das System als Modell beschrieben und drittens erfolgt die qualitative Analyse. Im vierten Schritt wird das Modell simuliert und abschließend erfolgt auf Basis der Simulationsergebnisse eine Optimierung des Entwurfs [Coy96, S. 10ff.].

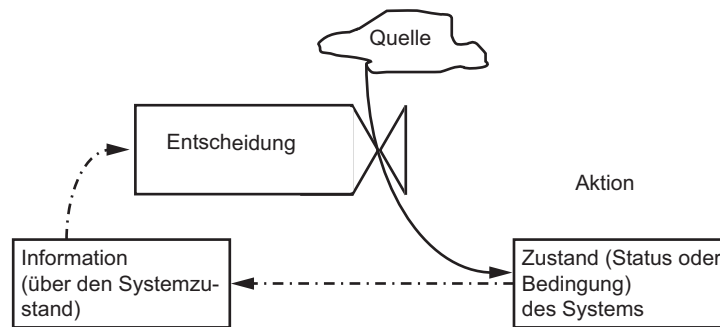


Bild 3-16: Regelkreis im System Dynamics [For72, S. 89]

## Bewertung

System Dynamics ermöglicht die Abbildung und Analyse komplexer Zusammenhänge, welche vom Zusammenspiel der Elemente eines Systems über den Zeitverlauf abhängen. Es wird somit ein Ansatz geliefert, um das Systemverhalten zu berücksichtigen. Welche Aspekte modelliert und simuliert werden, ist dabei von der Anwendung des Ansatzes abhängig.

### 3.4.2 Methode zur Zielabhängigkeitsanalyse nach DUMITRESCU

Die Methode zur Zielabhängigkeitsanalyse ist Teil der Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme nach DUMITRESCU [Dum11, S. 102ff.]. Sie baut auf der Methode zur Identifikation von Selbstoptimierungspotential nach GAUSEMEIER ET AL. auf [GZF+07, S. 4ff.], [ADG+09, S. 170ff.], [GIV+14, S. 52ff.]. Das Vorgehen nach DUMITRESCU gliedert sich in vier Phasen:

**Ermittlung zielrelevanter Einflussausprägungen:** Im ersten Schritt werden die Ziele des Systems identifiziert und auf Basis des Partialmodells *Umfeld* der Prinzipiösung (vgl. Abschnitt 2.5.6) die Einflüsse ermittelt, welche die identifizierten Ziele beeinflussen. Für die identifizierten Einflüsse werden qualitative Ausprägungen ermittelt [Dum11, S. 102].

**Abbildung der Zielauswirkung der Einflussausprägungen:** In einer Zielprioritätsmatrix (vgl. Bild 3-17) werden die Einflüsse und ihre Ausprägungen den Zielen gegenübergestellt. Unter der Fragestellung „Wie wirkt sich die Einflussausprägung *i* (Zeile) auf die Zielpriorität der Systemziele *j* (Spalte) aus?“ wird die Auswirkung der Einflüsse auf

die Ziele bewertet. Für jede Kombination wird die Zielprioritätsänderung abgebildet [Dum11, S. 102f.].

Zielprioritätsmatrix (Auszug)		Ziele	Geringer Energieverbrauch	Hohe Fahrsicherheit	Hoher Komfort	Geringer Reifenverschleiß					
<b>Fragestellung:</b> Wie wirkt sich die Einflussausprägung i (Zeile) auf die Zielpriorität der Systemziele j (Spalte) aus?											
<b>Bewertungsmaßstab:</b> -- = starke Verringerung der Zielpriorität - = Verringerung der Zielpriorität 0 = keine Auswirkung + = Erhöhung der Zielpriorität ++ = starke Erhöhung der Zielpriorität											
Einflüsse	Ausprägungen						Nr.	1	2	3	4
Unebenheiten	vorhanden						1	0	+	+	0
	nicht vorhanden	2	0	0	0	0					

Bild 3-17: Zielprioritätsmatrix nach DUMITRESCU [Dum11, S. 103]

**Bildung relevanter Situationen:** Zur Bildung relevanter Situationen werden im ersten Schritt nicht relevante Ziele und Einflüsse gestrichen (Faktoren die durchgängig mit *keine Auswirkung* bewertet wurden). Die verbleibenden Einflüsse werden zu konsistenten Situationen kombiniert. Es gilt zu beachten, dass diese keine Kombination von Ausprägungen enthalten, welche so in der Realität nicht auftauchen [Dum11, S. 103].

**Auswertung der Situationsabhängigkeit der Ziele:** Abschließend werden die Zielprioritäten für die jeweiligen Situationen aus der Zielprioritätsmatrix zusammengezählt. Auf dieser Basis wird eine situationsabhängige Zielpriorität ermittelt. Zeigt sich, dass sich Ziele in den Situationen bedingen, ist das Potential für den Einsatz von Selbstoptimierung gegeben. Die Ziele werden im Partialmodell *Zielsystem* abgebildet (vgl. Abschnitt 2.5.6) [Dum11, S. 103f.].

### Bewertung

Mit Hilfe der Zielprioritätsmatrix lässt sich die Wirkung der äußeren Einflüsse auf die Ziele eines Intelligenten Technischen Systems im Rahmen des Selbstoptimierungsprozesses abbilden. Es liefert somit einen Baustein zur Umsetzung des Selbstoptimierungsprozesses und somit zur Berücksichtigung des Systemverhaltens. Sie ist integraler Bestandteil der Konzipierung bei der Integration von kognitiven Funktionen (vgl. Abschnitt 2.5.6).

### 3.4.3 Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme nach Pook

Die Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme nach POOK gliedert sich wie Bild 3-18 zeigt in vier Phasen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind insbesondere die Ursache-Wirkbeziehungen der Zielkonflikte interessant.

**Entwicklung der Zielhierarchie des Systems:** Ziel der Phase sind Systemziele. Ausgehend von den Funktionen der Informationsverarbeitung in der Funktionshierarchie werden die Anforderungen ermittelt, aus denen die Funktionen resultieren. Basierend auf den Anforderungen lassen sich die Ziele der Ziel-Mittel-Ebene formulieren. Eine Beschreibung der externen und inhärenten Ziele (vgl. Abschnitt 2.3.1) erfolgt auf Grund von nicht-funktionalen Anforderungen [Poo11, S. 97f.].

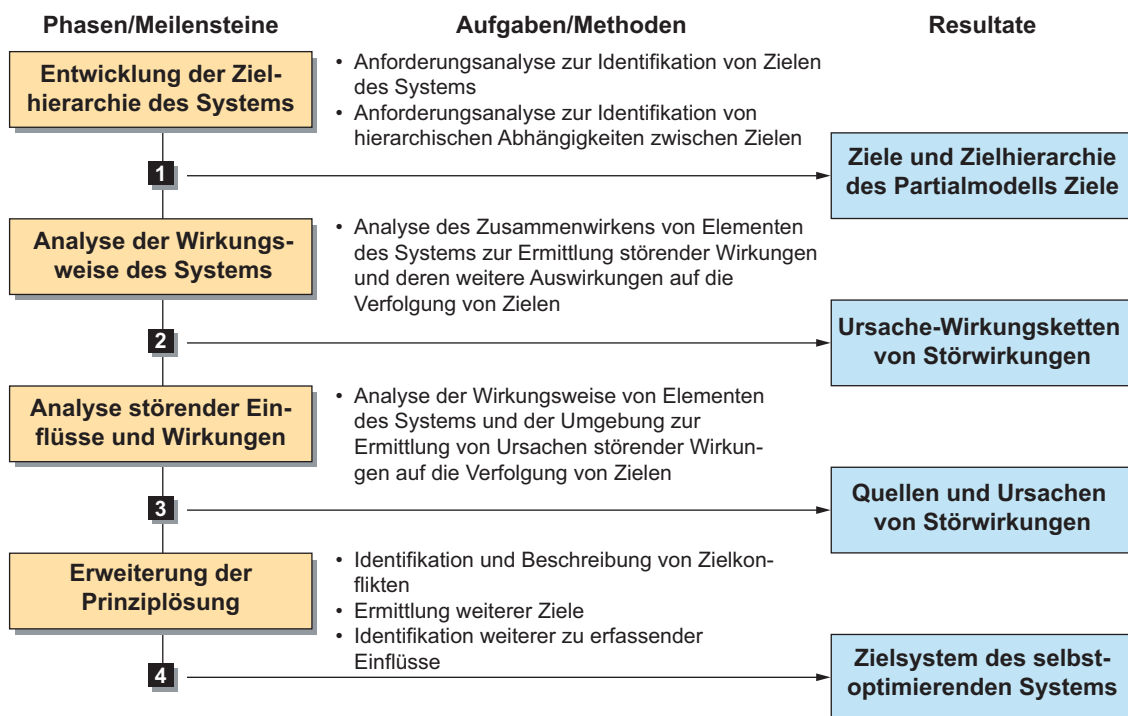


Bild 3-18: Vorgehen beim Entwurf von Zielsystemen nach POOK [Poo11, S. 97]

**Analyse der Wirkungsweise des Systems:** Für die identifizierten Ziele werden in dieser Phase störende Wirkungen ermittelt, welche im Betrieb auf die Zielgrößen/-variablen wirken. Hierzu wird für jedes Ziel ein Fehlzustandsbaum erstellt; in diesem werden die Störwirkungen als Einflüsse beschrieben. Ergebnis der Phase sind die Störwirkungen auf die Ziele und ihre Ursachen [Poo11, S. 98].

**Analyse störender Einflüsse und Wirkungen:** Die Fehlzustandsbäume werden in der dritten Phase um störende Wirkungen von Einflüssen ergänzt. Hierzu werden sich verändernde Umgebungsbedingungen sowie Einflüsse untersucht. Zudem wird ausgehend von den Störquellen ermittelt, ob diese Ursache für weitere Störungen sind. Auf Basis der

vollständigen Fehlerzustandsbäume lassen sich Zielkonflikte identifizieren [Poo11, S. 98].

**Erweiterung der Prinziplösung:** Das Partialmodell Zielsystem wird so angepasst, dass es nur Ziele enthält, welche in Konflikt zueinander stehen. Die Zielkonflikte werden so beschrieben, dass sich eine Kausalkette der Ursache-Wirkbeziehungen auf das Systemverhalten ergibt. Die Wirkstruktur wird um Sensoren, Informationsverarbeitungen und -flüsse erweitert, so dass eine Lösung der Zielkonflikte im Rahmen des Selbstoptimierungsprozesses im Betrieb möglich ist [Poo11, S. 98f.].

### **Bewertung**

Die Methode nach POOK ist ebenfalls integraler Bestandteil der Konzipierung und unterstützt die Entwicklung des Zielsystems (vgl. Abschnitt 2.5.6). Die Methode berücksichtigt die Wirkung der äußeren Einflüsse auf die Ziele und zeigt Zielkonflikte auf. Mittels Kausalketten wird der resultierende Einfluss auf das Systemverhalten Intelligenter Technischer Systeme abgebildet.

#### **3.4.4 Verfahren zur situationsspezifischen Bestimmung und Gewichtung von Entwicklungsprozesszielen nach KAHL**

Das Verfahren zur situationsspezifischen Bestimmung und Gewichtung von Entwicklungsprozesszielen ist Teil des Rahmenwerks für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme nach KAHL. Das Verfahren ermöglicht die Umsetzung der Phase *Bestimmung der Systemziele* des Selbstoptimierungsprozesses (vgl. Abschnitt 2.3.2). Der Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme gliedert sich in der Phase Entwurf und Ausarbeitung zum einen hinsichtlich der beteiligten Disziplinen und zum anderen hinsichtlich der Modulstruktur (vgl. Abschnitt 2.5.6, Bild 2-12). Das Verfahren zur situationsspezifischen Bestimmung und Gewichtung der Entwicklungsprozessziele umfasst die in Bild 3-19 dargestellten und im Folgenden beschriebenen fünf Phasen.

**Bestimmung des internen Zielsystems:** Anhand der Eigenschaften des zu entwickelnden Systems, des Unternehmensumfelds sowie des vorliegenden Entwicklungsstands werden externe und inhärente Ziele des Entwicklungsprozesses bestimmt. Externe Ziele können bspw. „minimiere Entwicklungszeit“ oder „minimiere Entwicklungskosten“ sein. Die internen und externen Ziele werden zusammengefasst und gemäß des vorliegenden Entwicklungsstands auf den Entwicklungsstrang je Modul heruntergebrochen [Kah13, S. 124ff.].

**Bestimmung der strategischen Zielpriorität:** Die ermittelten externen und inhärenten Ziele werden in einer strategieorientierten Relevanz-Matrix vor dem Hintergrund des Entwicklungsauftrags und der gewählten Strategieoptionen gegenübergestellt und paarweise verglichen. Dieser Vergleich erfolgt in Anlehnung an den Analytic Hierarchy Process (AHP) nach SAATY [Saa80, S. 17ff.], [Kah13, S. 126f.]. Für jede Zielkombination wird



bewertet ob ein Ziel im Rahmen der Entwicklung eine größere oder gleich große Zielpriorität besitzt. Ergebnis der Phase sind die strategischen Zielprioritäten [Kah13, S. 127].

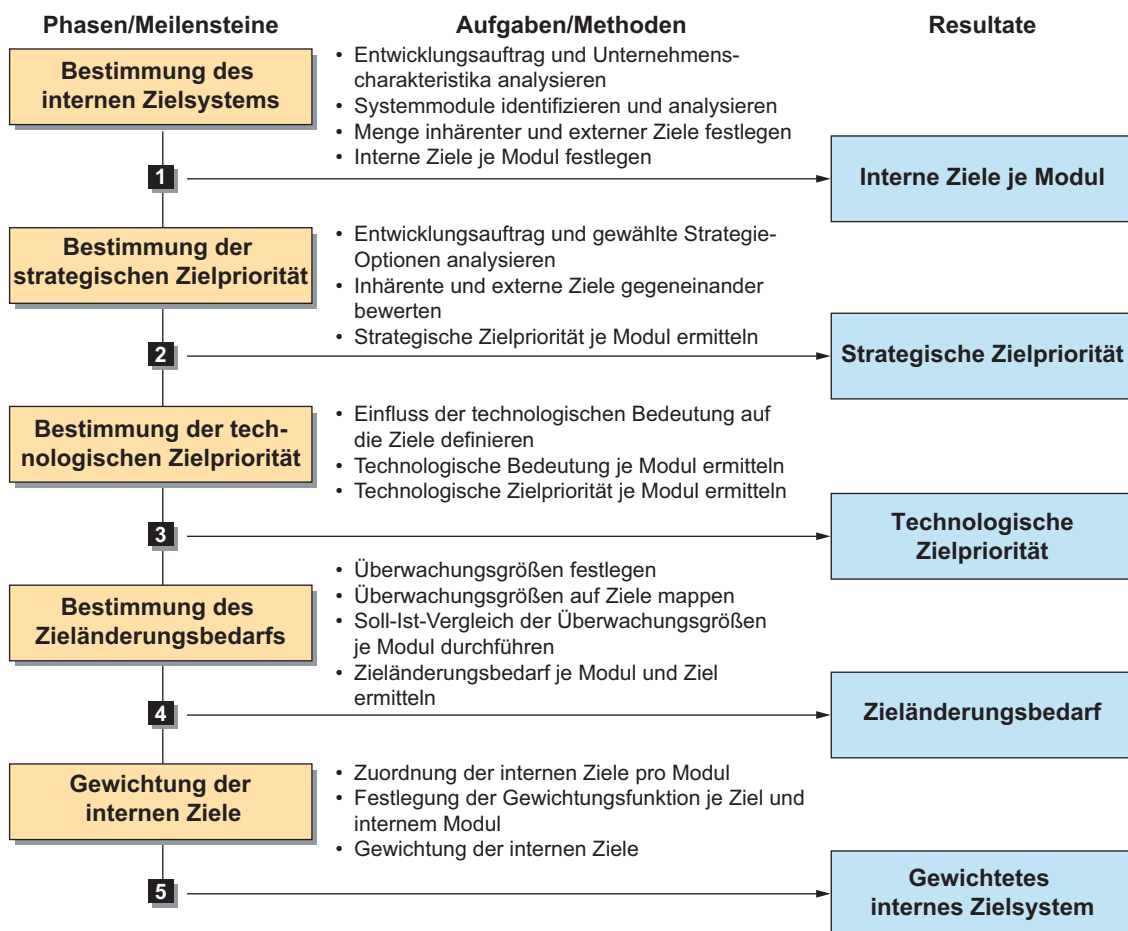


Bild 3-19: Ablauf des Verfahrens zur situationsspezifischen Bestimmung und Gewichtung von Entwicklungsprozesszielen nach KAHL [Kah13, S. 124]

**Bestimmung der technologischen Zielpriorität:** In der dritten Phase werden die Ziele aus technologischer Sicht priorisiert, da die Eigenschaften der Module des Entwicklungsgegenstands Einfluss auf die Ziele im Prozessstrang besitzen. Hierzu wird zunächst die technologische Bedeutung der Module anhand von Attributen (Komplexität, Dynamik etc.) ermittelt. Mit Hilfe einer technologieorientierten Einflussmatrix wird festgelegt, wie sich die technologische Bedeutung des Moduls auf die Ziele des Entwicklungsprozessstrangs auswirken. Auf Basis der Korrelation wird die technologische Zielpriorität für jedes Ziel des Modulentwicklungsstrangs mittels einer Priorisierungsfunktion festgelegt. Resultat der Phase ist die normierte, prozentuale, technologische Zielpriorität je Ziel und Modul [Kah13, S. 127f.].

**Bestimmung des Zielgewichtungsänderungsbedarfs:** Für die situationsspezifische Gewichtung der Ziele wird abschließend die Abweichung vom aktuellen Projektplan und der resultierende Zieländerungsbedarf ermittelt. Dazu werden die Überwachungsgrößen,

wie verbrauchtes Budget oder verstrichene Zeit, festgelegt. Diese erfassen den Entwicklungsprozess aus Sicht des Projektmanagements. In der Überwachungsgrößen-Ziel-Einflussmatrix wird definiert, wie sich eine Abweichung vom Soll-Zustand der Überwachungsgröße auf die Gewichtung eines oder mehrerer Ziele auswirkt. Bei einer Änderung des Ist-Zustands lässt sich auf Basis der Einflussmatrix und der Abweichung vom Soll-Zustand in Prozent der Zielgewichtungsänderungsbedarf je Modulstrang ermitteln. Der ermittelte Änderungsbedarf wird in einer Matrix abgebildet [Kah13, S. 129f.].

**Gewichtung der internen Ziele:** Die internen Ziele für jeden Modulentwicklungsstrang werden anhand der strategischen und technologischen Zielpriorität mittels einer Gewichtungsfunktion sowie dem aktuellen Zielgewichtungsänderungsbedarf priorisiert. Ergebnis der Phase sind die prozentualen Gewichtungen der internen Ziele je Modul. Anhand dieser Zielgewichtungen kann aus einer Menge generierter möglicher Prozesspläne der optimale Prozessplan ausgewählt werden [Kah13, S. 130f.].

### **Bewertung**

Das Verfahren nach KAHL ermöglicht die Gewichtung der Ziele für Entwicklungsprozesse. Es unterstützt somit die Anpassung der Ziele im Rahmen des Selbstoptimierungsprozesses und liefert ein Vorgehen zur Abbildung dieses Prozesses im Rahmen der Konzipierung für das zu entwickelnde Intelligente Technische System.

## **3.5 Handlungsbedarf**

Bild 3-20 fasst die Bewertung der vorgestellten Ansätze aus dem Stand der Technik hinsichtlich der Anforderungen an eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme zusammen (vgl. Abschnitt 2.7). Keiner der betrachteten Ansätze erfüllt alle Anforderungen. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt der verbleibende Handlungsbedarf aufgezeigt.

### **A1: Integraler Bestandteil der Konzipierung**

Die Systematik hat die Synthese-, Analyse- und Auswahlaktivitäten kontinuierlich im Rahmen der Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme zu unterstützen. Die betrachteten Ansätze unterstützen meist nur einzelne Tätigkeiten und einzelne Aspekte der Wirtschaftlichkeit. Es mangelt somit an einer durchgängigen Wirtschaftlichkeitsorientierung im Rahmen des Konzipierungsprozesses.

### **A2: Entscheidungsgrundlage**

Diese Anforderung wird von einer Vielzahl der betrachteten Ansätze erfüllt. Es gilt somit, sinnvolle Aspekte aus dem Stand der Technik zu identifizieren und in die zu entwickelnde Systematik zu integrieren.

**A3: Rahmen für die wirtschaftliche, disziplinspezifische Entwicklung**

Bestehende Ansätze, wie das Target Costing oder die Wertanalyse, legen die zulässigen Kosten für die einzelnen Elemente der Lösung fest und liefern somit einen Rahmen für die wirtschaftliche, disziplinspezifische Entwicklung. Diese Ansätze können unter Berücksichtigung anderer Anforderungen einen Beitrag bei der Entwicklung der Systematik leisten.

**A4: Einheitliches Verständnis der Wirtschaftlichkeit**

Ein einheitliches Verständnis mittels eines Wirtschaftlichkeitsmodells, welches die Spezifikationstechnik um den Aspekt der Wirtschaftlichkeit ergänzt, wird von keinem der betrachteten Ansätze ermöglicht. Die betrachteten Ansätze, wie die Kostengliederungsstruktur oder die Ansätze zur Kundenorientierung nach KANO ET AL., ermöglichen das Verständnis von Teilaspekten. Es ist somit eine Kombination der Ansätze sowie eine entsprechende Modellierungssprache notwendig, um die Wirtschaftlichkeit mittels eines konzeptuellen Modells abzubilden.

**A5: Plausibilität**

Zur Erstellung der Kostengliederungsstruktur werden Vorgaben zur Unterstützung der Entwickler bereitgestellt. Sie können als Ausgangspunkt für Hilfsmittel zur Modellierung eines plausiblen Wirtschaftlichkeitsmodells im Rahmen der Systematik genutzt werden.

**A6: Lebenszykluskostenanalyse**

Die Analyse der Lebenszykluskosten wird für Teilaspekte von allen Ansätzen im Rahmen des Kostenmanagements erfüllt. Eine umfassende Analyse ermöglichen die Ansätze zur Lebenszykluskostenanalyse. Die Abbildung der Kosten erfolgt mit Hilfe der Kostengliederungsstruktur. Es gilt, die Ansätze vor dem Hintergrund mangelnder Informationen im Rahmen der Konzipierung in die Systematik zu integrieren.

**A7: Kundenorientierte Analyse**

Die vorgestellten Ansätze zur Kundenorientierung im Rahmen der Produktentstehung ermöglichen in Kombination eine durchgängige Kundenorientierung. Für die kundenorientierte Analyse im Rahmen der Systematik sind diese Ansätze daher zu kombinieren und in den Konzipierungsprozess zu integrieren.





























































































































































<b>Bewertung</b> der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen. <b>Fragestellung:</b> Wie gut erfüllen die untersuchten Ansätze (Zeile) die gestellten Anforderungen an eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme (Spalte)? <b>Bewertungsskala:</b>  = nicht erfüllt  = teilweise erfüllt  = voll erfüllt		Anforderungen (A)								
		Übergeordnet			Modell		Analyse			
		Integraler Bestandteil der Konzipierung	Entscheidungsgrundlage	Rahmen für die wirtschaftliche, disziplinspezifische Entwicklung	Einheitliches Verständnis	Plausibilität	Lebenszykluskostenanalyse	Kundenorientierte Analyse	Berücksichtigung der Abhängigkeiten	Berücksichtigung des Systemverhaltens
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
<b>Bewertung</b>	Nutzwertanalyse und verwandte Ansätze									
	Technisch-wirtschaftliche Bewertung									
<b>Kundenorientierung</b>	Nutzenpotentiale (PÜMPIN)									
	Conjoint-Analyse									
	Ansätze zur Bewertung der Kundenzufriedenheit									
	Einfluss der Kundenzufriedenheit auf den Unternehmenserfolg									
<b>Kostenmanagement</b>	Target Costing									
	Wertanalyse									
	Leitfaden für ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement (ZIRKLER)									
	Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien (BRINK)									
	Kostengliederungsstruktur									
	Analyse der Lebenszykluskosten									
	Kostenbasierte FMEA									
<b>Systemverhalten</b>	System Dynamics									
	Methode zur Zielabhängigkeitsanalyse (DUMITRESCU)									
	Methode zum Entwurf von Zielsystemen (POOK)									
	Verfahren zur situationsspezifischen Bestimmung und Gewichtung (KAHL)									

Bild 3-20: Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der Anforderungen an eine Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme

**A8: Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Elemente**

Die Ansätze im Stand der Technik berücksichtigen die Abhängigkeiten der Elemente nur partiell. Beispielsweise werden die Abhängigkeiten zwischen Nutzen und Kundenzufriedenheit durch KANO ET AL. berücksichtigt. MATZLER und STAHL fokussieren den Zusammenhang zwischen Kundenzufriedenheit und Unternehmenswert. In der Kostengliederungsstruktur werden die Abhängigkeiten der Kosten über den Lebenszyklus berücksichtigt. Im Rahmen der Systematik gilt es, eine umfassende Analyse und Bewertung der Abhängigkeiten zwischen den Kosten, dem Nutzen und der Wirtschaftlichkeit für die Lösungsvarianten zu ermöglichen.

**A9: Berücksichtigung des Systemverhaltens**

System Dynamics liefert einen prinzipiellen Ansatz zur Abbildung des Verhaltens und der Dynamik komplexer Systeme. Diesen gilt es im Rahmen der Systematik zu adaptieren und auf Intelligente Technische Systeme zu übertragen. Ziel ist die Abbildung des Selbstoptimierungsprozesses. Hierbei können die betrachteten Ansätze nach DUMITRESCU, POOK und KAHL Ansatzpunkte liefern.



## 4 Die Systematik im Überblick

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Die Systematik soll den identifizierten Herausforderungen und Anforderungen der Problemanalyse (vgl. Abschnitte 2.6 und 2.7) sowie dem in Abschnitt 3.5 aufgezeigten Handlungsbedarf gerecht werden.

Die Systematik besteht aus einem Wirtschaftlichkeitsmodell sowie Methoden und Vorgehensweisen zu dessen Entwicklung und Bewertung (vgl. Bild 4-1). In Abschnitt 4.1 wird das Wirtschaftlichkeitsmodell vorgestellt, welches die Spezifikationstechnik CONSENS um den Aspekt der Wirtschaftlichkeit ergänzt (vgl. Abschnitt 2.5.6). Die einzelnen Phasen der Systematik werden in Abschnitt 4.2 kurz beschrieben. Die Erstellung des Wirtschaftlichkeitsmodells erfolgt als integraler Bestandteil der disziplinübergreifenden Konzipierung (vgl. Abschnitt 2.5.6). Aus diesem Grund wird das Vorgehen in den disziplinübergreifenden Konzipierungsprozess der Entwicklungsmethodik für Intelligente Technische Systeme integriert.

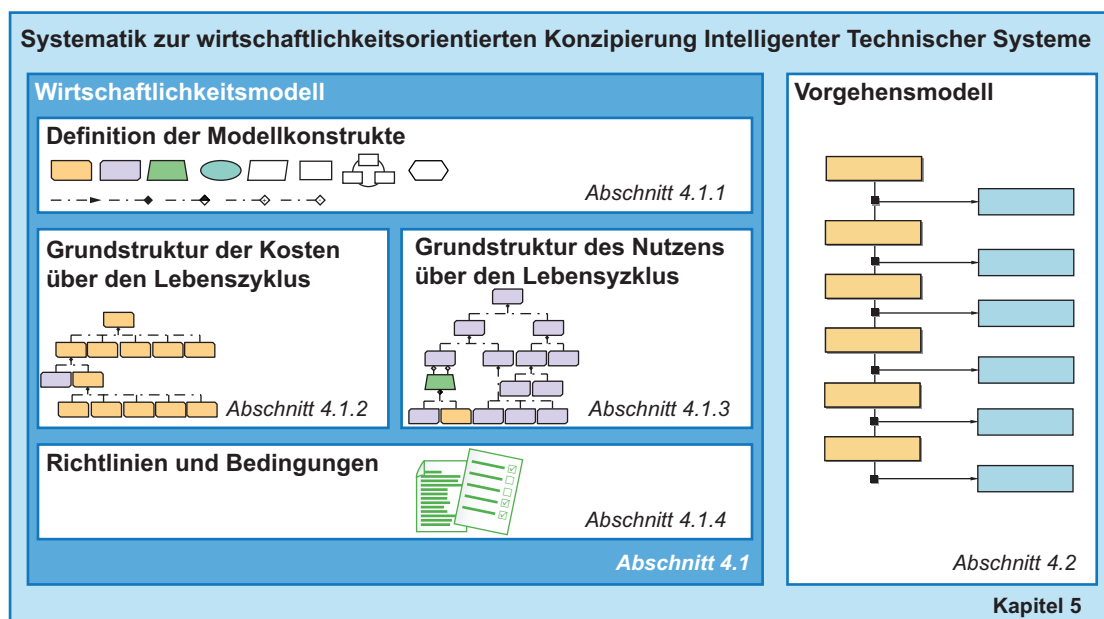


Bild 4-1: Bestandteile der Systematik

### 4.1 Wirtschaftlichkeitsmodell

Die Prinziplösung legt die Rahmenbedingungen für den disziplinspezifischen Entwurf und die Ausarbeitung des Intelligenten Technischen Systems sowie etwa 60 % der Lebenszykluskosten und den Großteil seines Nutzens fest [Kol98, S. 62], [Bue09, S. 8]. Die Wirtschaftlichkeit des Systems über den gesamten Lebenszyklus ist daher bereits im Rahmen der Konzipierung zu berücksichtigen. In dieser frühen Phase der Entwicklung ist lediglich eine Abschätzung möglich. Dennoch: Der Präzisionsgrad ist ausreichend, um

grundlegende Designentscheidungen auf Basis der Wirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus des Systems im Rahmen der Konzipierung zu treffen und so ein Verständnis für die Entstehung von Kosten und Nutzen beim Entwickler zu schaffen. Der Präzisionsgrad der Aussage steigt jedoch mit zunehmenden Detaillierungsgrad in der Entwicklung [SF06, S. 1420f.], [VDI2884, S. 4].

Aufbauend auf dem Stand der Technik wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Wirtschaftlichkeitsmodell für den Einsatz in der disziplinübergreifenden Konzipierung entwickelt. Das Modell bildet die Zusammenhänge von Kosten und Nutzen vor dem Hintergrund der Prinzipiellösung Intelligenter Technischer Systeme ab. Es ermöglicht den Entwicklern somit ein frühzeitiges Verständnis für die Entstehung von Kosten und Nutzen über den Lebenszyklus des zu entwickelnden Systems. Ziel ist ein plausibles Wirtschaftlichkeitsmodell, welches die Spezifikationstechnik CONSENS ergänzt und die drei Anforderungen *Vergleichbarkeit*, *Vollständigkeit* und *Richtigkeit* erfüllt (vgl. Abschnitt 2.5.5).

In Abschnitt 4.1.1 werden zunächst die Modellkonstrukte des Wirtschaftlichkeitsmodells definiert. Auch wenn sich Kosten und Nutzen je nach betrachtetem System und Stakeholder unterscheiden, ist eine gewisse Grundstruktur zu erkennen. Diese wurde im Rahmen der Arbeit extrahiert und wird in den Abschnitten 4.1.2 und 4.1.3 vorgestellt. Die Grundstruktur dient als Ausgangspunkt für die Entwicklung des Modells. Um den Anforderungen *Vergleichbarkeit*, *Vollständigkeit* und *Richtigkeit* an das Wirtschaftlichkeitsmodell gerecht zu werden, wurden Richtlinien und Bedingungen bei der Modellierung in Abschnitt 4.1.4 definiert. Diese gilt es im Rahmen der Modellierung durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam<sup>69</sup> einzuhalten.

#### 4.1.1 Definition der Modellkonstrukte

Ziel ist ein Wirtschaftlichkeitsmodell, welches von allen beteiligten Disziplinen gleichermaßen gelesen und verstanden werden kann. Es wird daher ein konzeptuelles Modell gewählt (vgl. Abschnitt 2.5.5). Im Modell wird zwischen Kosten-, Nutzen-, Wirtschaftlichkeits- und Stakeholderelementen sowie Multiplikatoren unterschieden. Stehen Elemente miteinander in Interaktion, wird dies durch eine Beziehung zwischen den Elementen dargestellt. Bild 4-2 zeigt eine Übersicht der Modellkonstrukte. Die Modellkonstrukte ergänzen die Spezifikationstechnik CONSENS. Für die Darstellung der Konstrukte wurde folgende graphische Notation (konkrete Syntax) gewählt: das orangene Polygon für ein Kostenelement, das gespiegelte violette Polygon für ein Nutzenelement, das grüne

---

<sup>69</sup> Das interdisziplinäre Entwicklungsteam ist so zusammenzustellen, dass es neben der technischen Expertise aus den an der Entwicklung beteiligten Disziplinen (vgl. Abschnitt 2.5.6) auch über einen Überblick über das Gesamtsystem sowie den Produktlebenszyklus verfügt [BF11, S. 45]. Hierzu ist die Integration der Marketing und Vertriebsabteilungen sowie des Rechnungswesens ratsam, um so den unmittelbaren und schnellen Austausch der häufig divergierenden Vorstellungen zu ermöglichen [HHB09, S. 82f.].



Trapez für ein Wirtschaftlichkeitselement, das türkise Oval für ein Stakeholderelement sowie das weiße Parallelogramm für einen Multiplikator. Ein Strichpunkt Pfeil wird, wie in CONSENS, für eine logische Beziehung verwendet. Eine Strichpunktlinie mit einer ausgefüllten schwarzen Raute steht für eine Aggregationsbeziehung; mit einer zweigeteilten Raute für eine Verhältnisbeziehung; mit einer nicht ausgefüllten Raute und einem „+“ für eine verstärkende und mit einem „-“ für eine dämpfende Beziehung.

Nachdem die konkrete Syntax durch die graphische Notation festgelegt wurde, wird im Folgenden die abstrakte Syntax und Semantik des Modells beschrieben:



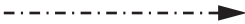





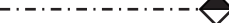
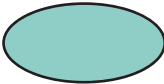


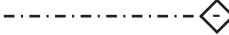
Elemente	Klassifikation	Beziehungen
Kostenelement 	Funktionsabhängiges Kosten-/Nutzelement 	Logische Beziehung 
Nutzelement 	Situationsabhängiges Kosten-/Nutzelement 	Aggregationsbeziehung 
Wirtschaftlichkeitselement 	Gesamtsystemabhängiges Kosten-/Nutzelement 	Verhältnisbeziehung 
Stakeholderelement 		Verstärkende Beziehung 
Multiplikator 		Dämpfende Beziehung 

Bild 4-2: Graphische Notation der Elemente und Beziehungen (konkrete Syntax)

## Elemente

Zur Abbildung der Kosten und des Nutzens über den Lebenszyklus eines Intelligenten Technischen Systems sowie dessen Wirtschaftlichkeit, werden die folgenden Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell eingesetzt:

- **Kostenelement:** Bei Kostenelementen handelt es sich um Kosten, die über den Lebenszyklus des Intelligenten Technischen Systems für die Stakeholder entstehen. Jedem Kostenelement wird ein Kostenwert als Eigenschaft zugewiesen (vgl. Bild 4-3).
- **Nutzelement:** Nutzelemente stellen den Nutzen dar, welcher für den Stakeholder über den Lebenszyklus durch Befriedigung seiner Bedürfnisse oder Erschließung von Nutzenpotentialen durch die technische Lösung entsteht. Einem Nutzelement

werden verschiedene Eigenschaften zugewiesen (vgl. Bild 4-3), wie die Höhe des erwarteten und erlebten Nutzens sowie einer Zuordnung zu einer Kano-Kategorie<sup>70</sup>.

- **Wirtschaftlichkeitselement:** Die Wirtschaftlichkeit ergibt sich aus dem Verhältnis von Kosten und Nutzen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Das Wirtschaftlichkeitselement stellt Kosten- und Nutzelemente gegenüber. Dem Element wird der Wert des Quotienten von Nutzwerten und Kostenwerten als Eigenschaft zugewiesen.
- **Stakeholderelement:** Die Stakeholder werden durch die Stakeholderelemente repräsentiert. Stakeholderelemente werden mit Kosten-, Nutzen- und Wirtschaftlichkeitselementen verknüpft, welche für den jeweiligen Stakeholder entstehen.
- **Multiplikator:** Die Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden; vielmehr beeinflussen sie sich mittels sogenannter Multiplikatoren. Die Auswahl der Multiplikatoren, wie bspw. die Auslastung des Systems oder der Marktanteil, für das Wirtschaftlichkeitsmodell erfolgt durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam für die vorliegende Entwicklungsaufgabe. Einen zentralen Multiplikator stellt die Kundenzufriedenheit dar, wie die Abschnitte 2.5.3 und 3.2.4 zeigen.

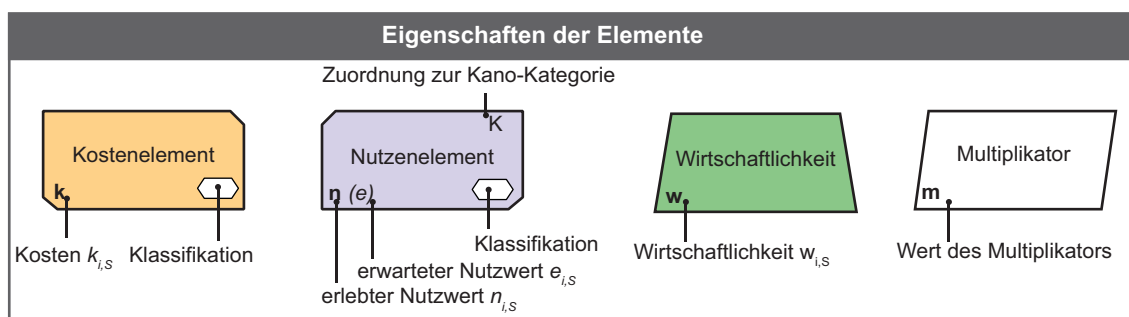


Bild 4-3: Eigenschaften der Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell

## Klassifikation

Die Kosten- und Nutzelemente des Wirtschaftlichkeitsmodells treten in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus Intelligenter Technischer Systeme auf und sind entweder von einzelnen Funktionen des Systems, vom Zusammenspiel der Funktionen in einer Situation oder von der Summe der Funktionen abhängig (vgl. Abschnitt 2.5.4). Diese Abhängigkeit wird mittels der Klassifikation der Elemente deutlich gemacht und findet bei der Bewertung der Elemente Berücksichtigung (vgl. Abschnitt 4.2).

<sup>70</sup> In Anlehnung an KANO ET AL. wird zwischen Basis-, Leistungs- und Begeisterungsattributen unterschieden. Je nach Kano-Kategorie wirkt sich die Differenz zwischen erlebtem und erwartetem Nutzen unterschiedlich auf die Kundenzufriedenheit aus (vgl. Abschnitt 3.2.3).

- **Funktionsabhängige Kosten-/Nutzelemente:** Elemente vom Typ «*funktionsabhängig*» sind von einzelnen Funktionen des Intelligenten Technischen System abhängig. Kosten- und Nutzelemente vom Typ «*funktionsabhängig*» können direkt Funktionen aus dem gleichnamigen Partialmodell zugeordnet werden.
- **Situationsabhängige Kosten-/Nutzelemente:** Elemente vom Typ «*situationsabhängig*» ergeben sich durch das Zusammenspiel der Teilfunktionen des Intelligenten Technischen Systems im Zeitverlauf. Sie werden vom Stakeholder je nach Betriebs-situation und Verhalten des Intelligenten Technischen Systems unterschiedlich bewertet, wie bspw. der Komfort oder die Betriebskosten.
- **Gesamtsystemabhängige Kosten-/Nutzelemente:** Elemente vom Typ «*gesamtsystemabhängig*» ergeben sich aus der Summe der Teilfunktionen. Sie werden vom Stakeholder in Hinblick auf das gesamte Intelligente Technische System bewertet. Beispiele für Elemente vom Typ «*gesamtsystemabhängig*» sind Vertriebskosten oder Entsorgungskosten. Einen Spezialfall der gesamtsystemabhängigen Elemente bilden die Elemente welche neben dem Gesamtsystem von dessen Verlässlichkeit abhängig sind. Diese Elemente werden als «*gesamtsystemabhängig*» klassifiziert, jedoch bei der Bewertung spezifisch betrachtet.

## Beziehungen

Die Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell lassen sich nicht unabhängig voneinander betrachten. Sie stehen vielmehr in Beziehung zueinander. Diese Beziehungen lassen sich wie folgt darstellen:

- **Logische Beziehung:** Die Semantik der logischen Beziehung ergibt sich aus der Bezeichnung der Beziehung [Kai14, S. 47]. Mittels der logischen Beziehung kann bspw. beschrieben werden, dass einem Stakeholder Kosten entstehen oder ein Stakeholder Nutzen aus etwas zieht.
- **Aggregationsbeziehung:** Die Aggregationsbeziehung beschreibt, dass das übergeordnete Element aus der Summe der ihm zugeordneten Elemente besteht (vgl. Bild 4-4). Die schwarze Raute deutet auf das Element, welches die anderen Elemente aggregiert. Einem Element sind entweder keins oder immer mindestens zwei Elemente mittels einer Aggregationsbeziehung zuzuweisen. Der Gewichtungsfaktor beschreibt, welchen Anteil das Element am übergeordneten Element hat. Die Summe der Gewichtungsfaktoren auf einer Ebene ergeben 100 Prozent.
- **Verhältnisbeziehung:** Durch die Verhältnisbeziehung werden Kosten- und Nutzelemente ins Verhältnis gesetzt. Die zweigeteilte Raute zeigt auf ein Wirtschaftlichkeitselement. Einem Wirtschaftlichkeitselement sind mindestens ein Kosten- und ein Nutzelement über eine Verhältnisbeziehung zugewiesen.

- **Verstärkende Beziehung:** Eine verstärkende Beziehung beschreibt, dass eine Veränderung des einen Elements eine Verstärkung des Werts des anderen Elements bewirkt. Die Verstärkung wird durch einen Verstärkungsfaktor bzw. eine -funktion vorgegeben. Die Raute deutet auf das Element, welches verstärkend beeinflusst wird. Durch ein „+“ oder „-“ am sich verändernden Element wird dargestellt, ob der Wert des Elements *steigen* oder *sinken* muss, um eine Wertsteigerung des Elements zu bewirken.
- **Dämpfende Beziehung:** Wenn eine Veränderung des einen Elements eine Dämpfung eines anderen Elements bewirkt, wird dies durch eine dämpfende Beziehung dargestellt. Die Höhe der Dämpfung wird durch einen Dämpfungsfaktor oder eine -funktion vorgegeben. Wie bei der verstärkenden Beziehung, zeigt die Raute auf das Element, welches dämpfend beeinflusst wird. Durch ein „+“ oder „-“ am sich verändernden Element wird dargestellt, ob der Wert des Elements *steigen* oder *sinken* muss, um eine Wertreduktion des Elements zu bewirken.

#### 4.1.2 Grundstruktur der Kosten im Lebenszyklus

Kosten, die für das zu entwickelnde Intelligente Technische System entstehen, lassen sich gemäß ihrer Entstehung den Phasen im Lebenszyklus zuordnen (vgl. Abschnitte 2.1.4 und 3.3.6). Diese Zuordnung ergibt eine Grundstruktur der Lebenszykluskosten für das Wirtschaftlichkeitsmodell, welche als Schablone dient und die Entwickler bei der Identifikation der relevanten Kosten im Konzipierungsprozess unterstützt. Diese Grundstruktur ist in Anlehnung an die Kostengliederungsstruktur hierarchisch aufgebaut (vgl. Abschnitt 3.3.5). Bild 4-4 zeigt die Grundstruktur der immer wiederkehrenden Kostenelemente über den Lebenszyklus sowie deren Klassifikation. Die Schablone ist für den betrachteten Entwicklungsgegenstand entsprechend zu spezifizieren.

Anregungen für die Identifikation weiterer Kostenelemente im Lebenszyklus geben u.a. [Bla78, S. 192] und [VDI2884, S. 12ff.]. Die einzelnen Kostenelemente werden im Folgenden kurz beschrieben.

Die **Lebenszykluskosten** bilden die oberste Hierarchieebene. Sie sind vom Typ «*gesamtsystemabhängig*» und aggregieren die im Lebenszyklus entstehenden Kosten. Je nach betrachtetem Stakeholder können sich die Lebenszykluskosten aus unterschiedlichen Kostenelementen zusammensetzen. Beispielsweise entstehen dem Unternehmen, welches das Intelligente Technische System vertreibt, keine Betriebskosten für das System. Für den Betreiber des Systems bzw. den Kunden entstehen wiederum Betriebskosten. Die Entstehung von Kosten im Lebenszyklus ist somit abhängig vom betrachteten Stakeholder.

Auf der nächsten Hierarchieebene setzen sich die Lebenszykluskosten aus Anschaffungs-, Inbetriebnahme-, Betriebs-, Instandhaltungs- sowie Entsorgungskosten zusammen. **Anschaffungskosten** für ein System können neben den eigentlichen Kosten für den

Erwerb auch Kosten für den Transport etc. beinhalten. Sie sind ebenfalls vom Typ «*gesamtsystemabhängig*». Anschaffungskosten, die durch den Erwerb des Systems entstehen setzen sich aus den Selbstkosten sowie dem Zielgewinn zusammen. Am Beispiel der Anschaffungskosten lässt sich anschaulich zeigen, dass Kosten und Nutzen nicht immer eindeutig voneinander trennbar sind. Der **Zielgewinn** ist aus Sicht des Unternehmens ein Nutzen, welcher aus dem Verkauf des Systems resultiert. Der Kunde hat diesen Gewinn jedoch als Teil seiner Anschaffungskosten für das System zu zahlen. Aus diesem Grund ist für die Bewertung der Kosten- und Nutzelemente eine einheitliche Bewertungsskala zu wählen.

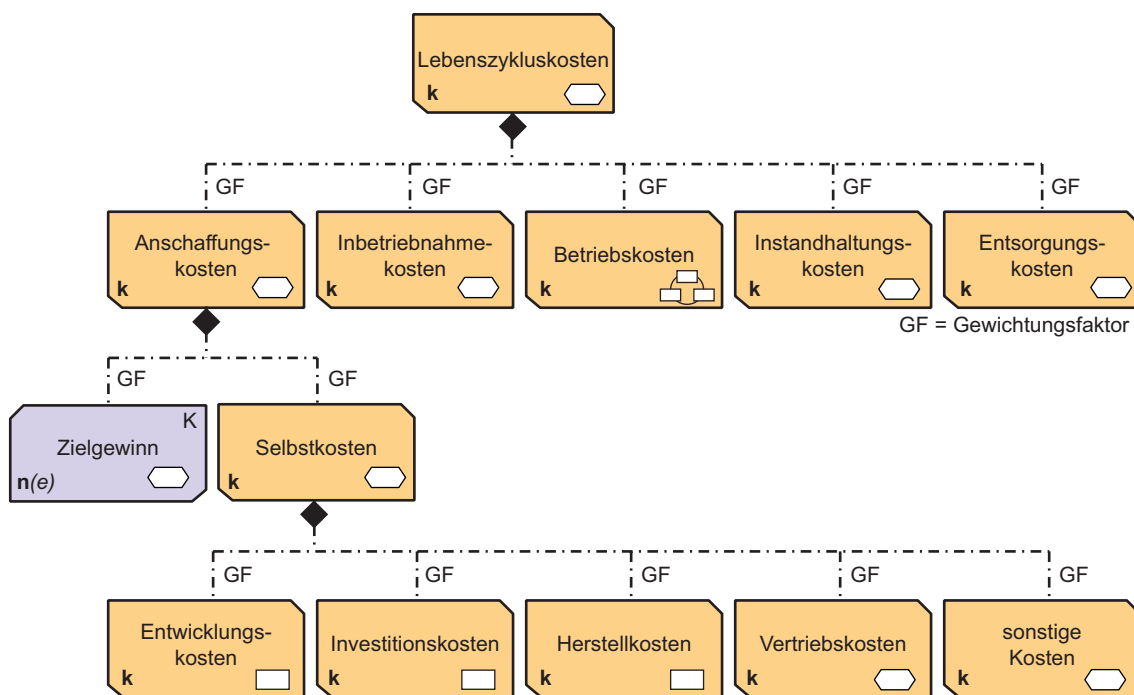


Bild 4-4: Grundstruktur der Lebenszykluskosten sowie deren Klassifikation

Die **Selbstkosten** sind ebenfalls vom Typ «*gesamtsystemabhängig*». Sie aggregieren die Kosten, die dem Unternehmen im betrieblichen Leistungserstellungsprozess entstehen. Diese umfassen: Entwicklungs-, Investitions-, Herstell-, Vertriebs- und sonstige Kosten. Unter **Entwicklungskosten**<sup>71</sup> werden die Kosten aggregiert, welche während der Entwicklung des Systems entstehen, bspw. Personalkosten. Sie sind vom Typ «*funktionsabhängig*». **Investitionskosten** entstehen insbesondere für Neuentwicklungen, wenn z.B. in neue Produktionsanlagen zur Herstellung des Systems investiert wird. Die **Herstellkosten** für das System unterteilen sich u.a. in Material- und Fertigungskosten. Sie aggregieren alle Kosten, welche während der Herstellung des Systems entstehen. **Vertriebskosten** entstehen im Vertriebsprozess für das betrachtete System. **Sonstige Kosten** umfassen

<sup>71</sup> Es wird von einer funktionsorientierten Entwicklung des Systems ausgegangen (vgl. [BDP+07, S. 161ff.]). Aus diesem Grund lassen sich die Entwicklungskosten einzelnen Funktionen des Systems zuordnen.

alle Kosten, die im betrieblichen Leistungserstellungsprozess anfallen, jedoch nicht eindeutig einem Produkt oder Prozess zuzuordnen sind. Hierunter fallen bspw. Verwaltungskosten.

Nach der Beschaffung wird das System in Betrieb genommen. Die im Rahmen der Inbetriebnahme anfallenden Kosten, wie Installationskosten, fallen unter die **Inbetriebnahmekosten**. Im Betrieb des Systems fallen bspw. Kosten für Energie, Personal oder Hilfsstoffe an. Diese werden unter den **Betriebskosten** aggregiert. Betriebskosten sind abhängig vom Verhalten des Systems in den einzelnen Betriebssituationen und werden daher als «*situationsabhängig*» klassifiziert. Kosten für die Instandhaltung des Systems sind abhängig von dessen Verlässlichkeit (vgl. Abschnitt 2.4). Unter **Instandhaltungskosten** fallen Kosten für Wartung, Materialkosten oder Gewährleistungskosten. Sie sind vom Typ «*gesamtsystemabhängig*». Zum Ende der Nutzungsdauer des Systems ist dieses außer Betrieb zu nehmen und zu entsorgen. Die hierbei entstehenden Kosten werden zu den Entsorgungskosten, ebenfalls vom Typ «*gesamtsystemabhängig*», aggregiert.

#### 4.1.3 Grundstruktur des Nutzens im Lebenszyklus

Die Grundstruktur des Nutzens im Lebenszyklus ist angelehnt an die Arbeiten von PÜMPIN sowie KELLER und KOTLER (vgl. Abschnitt 2.1.5) [Püm92, S. 50], [SFC01, S. 784], [Kel93, S. 2ff.]. Wie in Bild 4-5 dargestellt lässt sich der Gesamtnutzen, der durch ein Intelligentes Technisches System über den Lebenszyklus für die Stakeholder resultiert, auf der obersten Hierarchieebene in die Nutzelemente Kunden- und Unternehmensnutzen unterteilen. Bild 4-5 zeigt die Grundstruktur der Nutzelemente. Sie dient ebenfalls als Schablone und ist für den betrachteten Entwicklungsgegenstand entsprechend zu spezifizieren. Ihr hierarchischer Aufbau ist angelehnt an die Struktur des Zielsystems in der Nutzwertanalyse (vgl. Abschnitt 3.1.1).

Der **Kundennutzen** resultiert aus der Befriedigung von Kundenbedürfnissen [Hom12, S. 497]. Er aggregiert die Nutzelemente subjektiver und objektiver Kundennutzen. Der **objektive Kundennutzen** ergibt sich aus der Funktionalität des Systems sowie dessen Verhältnis zu den Anschaffungskosten, also der Wirtschaftlichkeit [EKL07, S. 60]. Nutzelemente, die aus den Eigenschaften des Systems resultieren, werden unter dem Nutzelement **Attribute** aggregiert und als «*funktionsabhängig*» klassifiziert. Diese Elemente werden vom Kunden anhand einzelner Funktionen und deren technische Umsetzung bewertet (vgl. Abschnitt 2.1.5). Aus dem Verhältnis des Nutzelements *Attribute* und dem *Kostenelement* Anschaffungskosten kann die Wirtschaftlichkeit zum Anschaffungszeitpunkt berechnet werden. Wird die Wirtschaftlichkeit verbessert, steigt der Nutzwert für das Nutzelement *objektiver Kundennutzen*; bei einer Verschlechterung sinkt dieser.

Der **subjektive Kundennutzen** setzt sich aus dem situationsabhängigen Nutzen sowie dem Nutzen zusammen, der aus der Einstellung des Kunden zum System und aus Syner-

gieeffekten resultiert. Beim **situationsabhängigen Nutzen** handelt es sich um den immateriellen, erlebbaren Nutzen, der sich bspw. aus der Benutzungsfreundlichkeit oder der Verlässlichkeit des Systems im Betrieb ergibt. Der Wert dieser Nutzenelemente kann je nach Situation variieren; sie werden daher als «*situationsabhängig*» klassifiziert. Weiterer Nutzen resultiert aus der Einstellung des Kunden zum System, dem Unternehmen oder der Marke. Dieser Nutzen resultiert aus der Bewertung des situationsabhängigen Nutzens sowie aus dem Image der Marke oder der Exklusivität des Systems. Entsprechende Nutzenelemente werden unter dem Nutzenelement **Einstellung** aggregiert. Nutzenelemente, welche aus der Vernetzung des Systems sowie Synergien zwischen Systemen oder Personen resultieren, werden unter dem Nutzenelement **Synergieeffekte** aggregiert.

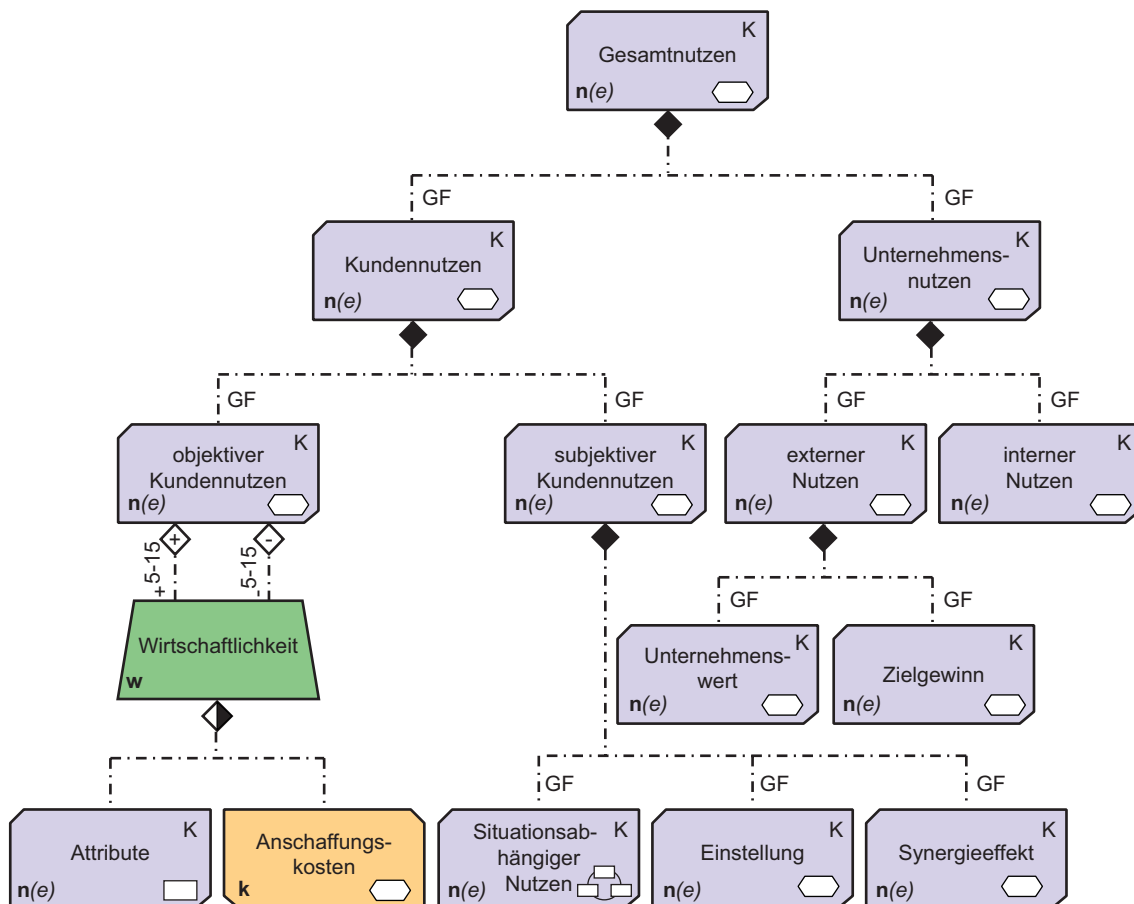


Bild 4-5: Grundstruktur des Nutzens im Lebenszyklus sowie deren Klassifikation

Unter dem **Unternehmensnutzen** wird der Nutzen zusammengefasst, welcher durch die Erschließung von Nutzenpotentialen durch Aktivitäten des Unternehmens resultiert (vgl. [Püm92, S. 50]). Es wird gemäß PÜMPIN zwischen externem und internem Nutzen unterschieden. Nutzenelemente des **externen Nutzens** ergeben sich aus der Erschließung externer Nutzenpotentiale. Zu ihnen zählen u.a. der **Unternehmenswert** (vgl. Abschnitte 2.5.3 und 3.2.4) und der **Zielgewinn**. Die Erschließung interner Nutzenpotentiale, wie Kostensenkungs-, Know-how- oder Synergiepotential stiftet Nutzen, welcher unter dem Nutzenelement **interner Nutzen** aggregiert wird.

#### 4.1.4 Richtlinien und Bedingungen der Modellierung

Die Modellkonstrukte zur Beschreibung der Wirtschaftlichkeit des Intelligenten Technischen Systems auf Basis der Prinziplösung sowie deren Zusammenspiel wurden in den vorherigen Abschnitten definiert. In Anlehnung an KAISER werden daraus Richtlinien und Bedingungen für die Modellierung abgeleitet. Richtlinien haben einen empfehlenden Charakter; Bedingungen sind bei der Modellierung verpflichtend und können rechnerintern ausgewertet werden<sup>72</sup>. Ziel ist ein plausibles Wirtschaftlichkeitsmodell, welches die drei Kriterien *Vergleichbarkeit*, *Vollständigkeit* und *Richtigkeit* erfüllt (vgl. [Kai14, S. 92]). Die Bedingungen und Richtlinien an die Kostenelemente sind dabei angelehnt an die Vorgaben zur Erstellung der Kostengliederungsstruktur (vgl. Abschnitt 3.3.5).

##### 4.1.4.1 Vergleichbarkeit

Entwickeln zwei interdisziplinäre Entwicklungsteams unabhängig voneinander mit derselben Modellierungssprache ein Modell des gleichen Intelligenten Technischen Systems, kommt es zu erheblichen Abweichungen in den Modellen. Die Ursache: Die Elemente und Beziehungen werden beliebig benannt. Nach KAISER trägt die Klassifikation der Elemente und der Beziehungen zur Vergleichbarkeit von Modellen bei. Es kann somit unabhängig von der Bezeichnung eine einheitliche Modellierung gewährleistet werden [Kai14, S. 92].

**Bedingung:** *Jedes Kosten- und Nutzelement ist einer Klasse zuzuordnen.*

Für **Kostenelemente** ergibt sich die Zuordnung zu einer Klasse aus der Art ihrer Entstehung im Lebenszyklus. Je nach Klasse gibt die Systematik verschiedene Bewertungsmethoden vor.

**Bedingung:** *Kostenelemente deren Entstehung von einer Funktion des Intelligenten Technischen Systems abhängen, sind als «funktionsabhängig» zu klassifizieren.*

**Bedingung:** *Kostenelemente deren Entstehung vom Gesamtsystem abhängt, sind als «gesamtsystemabhängig» zu klassifizieren.*

**Bedingung:** *Kostenelemente deren Entstehung von der Betriebssituation des Intelligenten Technischen Systems abhängt, sind als «situationsabhängig» zu klassifizieren.*

Für **Nutzelemente** ergibt sich die Zuordnung zu einer Klasse aus der Art der Bewertung durch den Kunden im Lebenszyklus.

---

<sup>72</sup> Voraussetzung für eine rechnerinterne Auswertung der Einhaltung von Bedingungen ist die rechnerinterne Repräsentation des Wirtschaftlichkeitsmodells sowie dessen Verknüpfung mit den Partialmodellen der Prinziplösung.



**Bedingung:** *Nutzenelemente, die vom Kunden auf Basis einer Funktion des Intelligenten Technischen Systems bewertet werden, sind als «funktionsabhängig» zu klassifizieren.*

**Bedingung:** *Nutzenelemente, die vom Kunden auf Basis des gesamten Intelligenten Technischen Systems bewertet werden, sind als «gesamtsystemabhängig» zu klassifizieren.*

**Bedingung:** *Nutzenelemente, die vom Kunden in jeder Betriebssituation erneut bewertet werden, sind als «situationsabhängig» zu klassifizieren.*

Wirtschaftlichkeits- und Stakeholderelemente, Multiplikatoren sowie logische, aggregierende, vergleichende, verstärkende und dämpfende Beziehungen sind bereits eindeutig klassifiziert.

#### 4.1.4.2 Vollständigkeit

Die Vollständigkeit eines Modells lässt sich per Definition nicht erreichen, da es sich um ein abstrahiertes Abbild einer Realität handelt [Kai14, S. 94], [Poh07, S. 279]. Aus der Grundstruktur der Lebenszykluskosten (Abschnitt 4.1.2) und des Nutzens (Abschnitt 4.1.3) Intelligenter Technischer Systeme sowie deren Zusammenspiel lassen sich jedoch Annahmen treffen, welche zur Vollständigkeit beitragen.

Die **Benennung der Elemente und Beziehungen** tragen zur Vollständigkeit des Modells bei und müssen gut gewählt sein. Verwendete Abkürzungen sind in einem Glossar festzuhalten [Kai14, S. 95].

**Bedingung:** *Elemente und Beziehungen müssen benannt werden [Kai14, S. 95].*

**Richtlinie:** *Ein projektweites Glossar enthält mindestens die Abkürzungen und die entsprechend ausgeschriebenen Elementbezeichnungen [Kai14, S. 95].*

Die **Benennung der Kostenelemente** ist so zu wählen, dass die Zuordnung zum Kostenträger eindeutig ist.

**Richtlinie:** *Kostenelemente sind so zu benennen, dass sie dem Kostenträger eindeutig zugewiesen werden können.*

Die **Benennung der Nutzelemente** ist so zu wählen, dass die Zuordnung zum Nutzenträger eindeutig ist.

**Richtlinie:** *Nutzelemente sind so zu benennen, dass sie dem Nutzenträger eindeutig zugewiesen werden können.*

**Wirtschaftlichkeitselemente** sind so zu benennen, dass deutlich wird, welche Kosten- und Nutzelemente ins Verhältnis gesetzt werden.

**Richtlinie:** *Wirtschaftlichkeitselemente sind so zu benennen, dass der Bezug zu den in das Verhältnis gesetzten Kosten- und Nutzelementen eindeutig ist.*

**Stakeholderelemente** werden nach dem Stakeholder benannt, welchen sie repräsentieren.

**Richtlinie:** *Stakeholderelemente sind nach dem Stakeholder zu benennen, den sie repräsentieren.*

Die Benennung von **Multiplikatoren** ist so zu wählen, dass der Sachverhalt, welchen sie beschreiben, eindeutig ist.

**Richtlinie:** *Multiplikatoren sind nach dem Sachverhalt zu benennen, den sie repräsentieren.*

Wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, ergibt sich die Semantik einer **logischen Beziehung** aus dessen Bezeichnung. Logische Beziehungen sind daher eindeutig zu benennen, sodass nicht nur dem Modellersteller sondern auch dem Modellnutzer der beschriebene Sachverhalt deutlich wird.

**Bedingung:** *Logische Beziehungen, die ein Stakeholderelement mit einem Kostenelement verbinden, sind mit „entsteht“ zu benennen.*

**Bedingung:** *Logische Beziehungen, die ein Stakeholderelement mit einem Nutzelement verbinden, sind mit „zieht“ zu benennen.*

**Bedingung:** *Logische Beziehungen, die ein Stakeholderelement mit einem Wirtschaftlichkeitselement verbinden, sind mit „resultiert für“ zu benennen.*

Aggregations- und Verhältnisbeziehungen sowie dämpfende und verstärkende Beziehungen sind auch ohne Benennung eindeutig beschrieben, sofern sie vollständig modelliert wurden.

Um sicherzustellen, dass die entstehenden **Kosten über den Lebenszyklus** vom interdisziplinären Entwicklungsteam vollständig im Wirtschaftlichkeitsmodell berücksichtigt werden, ist die Grundstruktur der Lebenszykluskosten für Intelligente Technische Systeme in Abschnitt 4.1.2 zu berücksichtigen. Es gilt die folgende Bedingung:

**Bedingung:** *Im Wirtschaftlichkeitsmodell ist jedes Kostenelement aus der Grundstruktur der Kosten im Lebenszyklus mindestens einmal vorhanden.*

Gleiches gilt für den **Nutzen über den Lebenszyklus**. Das interdisziplinäre Entwicklungsteam hat sich an der Grundstruktur aus Abschnitt 4.1.3 zu orientieren und die folgende Bedingung einzuhalten:

**Bedingung:** *Im Wirtschaftlichkeitsmodell ist jedes Nutzelement aus der Grundstruktur des Nutzens im Lebenszyklus mindestens einmal vorhanden.*

Das Wirtschaftlichkeitsmodell besteht nicht nur aus der graphischen Notation. Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit des betrachteten Intelligenen Technischen Systems ist es notwendig den betrachteten Kosten- und Nutzelementen Eigenschaften in Form von Werten zuzuweisen. Zur Bewertung werden geeignete Bewertungsmethoden durch die *Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung* vorgegeben (vgl. Abschnitt 4.2 und Kapitel 5).

**Bedingung:** *Jedem Kostenelement ist ein Kostenwert als Eigenschaft zuzuweisen.*

**Bedingung:** *Jedem Nutzelement ist ein erwarteter Nutzwert, ein erlebter Nutzwert sowie eine Kano-Kategorie als Eigenschaft zuzuweisen.*

Der Wert der **Wirtschaftlichkeitselemente** ergibt sich aus dem Verhältnis der mit dem Element in Beziehung stehenden Nutzen- und Kostenelementen.

**Bedingung:** *Jedem Wirtschaftlichkeitselement ist ein Wert als Eigenschaft zuzuweisen.*

**Bedingung:** *Der Wert für die Wirtschaftlichkeit ergibt sich aus dem Quotienten der mittels der Verhältnisbeziehung verbundenen Nutzen- und Kostenelemente.*

**Stakeholderelemente** sind im Wirtschaftlichkeitsmodell vollständig modelliert, wenn die folgenden Richtlinien berücksichtigt wurden:

**Bedingung:** *Ein Stakeholderelement hat mindestens eine logische Beziehung zu einem Kosten- und einem Nutzelement sowie zu einem Wirtschaftlichkeitselement.*

**Bedingung:** *Ein Stakeholderelement, das durch eine logische Beziehung mit einem Kosten- oder Nutzelement verbunden ist, ist auch mit dessen aggregierten Elementen verbunden.*

**Multiplikatoren** beeinflussen die mit ihnen in Beziehung stehenden Elemente, ihnen ist ebenfalls ein Wert als Eigenschaft zugewiesen. Dieser Wert kann im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse (vgl. Abschnitt 5.6.2) variiert werden.

**Bedingung:** *Jedem Multiplikator ist ein Wert als Eigenschaft zuzuweisen.*

Wie zuvor beschrieben sind alle **Beziehungen** mit Ausnahme der logischen Beziehung bereits eindeutig benannt, sofern sie vollständig modelliert sind. Für die vollständige Modellierung sind die folgenden Bedingungen und Richtlinien zu beachten.

**Bedingung:** *Einer Aggregationsbeziehung ist ein Gewichtungsfaktor zuzuordnen.*

**Bedingung:** *Einer verstärkenden Beziehung ist ein Verstärkungsfaktor oder eine -funktion zuzuweisen.*

**Bedingung:** *Die Art der Veränderung bei einer verstärkenden Beziehung ist durch ein „+“ für steigen und ein „-“ für sinken zu spezifizieren.*

- Richtlinie:** *Die Veränderung eines Elements kann bei einer verstärkenden Beziehung durch Nebenbedingungen genauer spezifiziert werden.*
- Bedingung:** *Einer dämpfenden Beziehung ist ein Dämpfungsfaktor oder eine -funktion zuzuweisen.*
- Bedingung:** *Die Art der Veränderung bei einer dämpfenden Beziehung wird durch ein „+“ für steigen und ein „-“ für sinken spezifiziert.*
- Richtlinie:** *Die Veränderung eines Elements kann bei einer dämpfenden Beziehung durch Nebenbedingungen genauer spezifiziert werden.*

#### 4.1.4.3 Richtigkeit

Gemäß des Grundsatzes der Richtigkeit wird zwischen syntaktischer und semantischer Richtigkeit unterschieden. *Syntaktische Richtigkeit* gilt für ein Modell, welches konsistent zum Metamodell erstellt wurde und somit formal korrekt ist. Ein formal korrektes Modell stellt jedoch noch nicht sicher, dass dieses auch semantisch richtig ist. Für *semantische Richtigkeit* gilt: Es ist sicherzustellen, dass das Modell dem Inhalt entspricht, den der Modellierer ausdrücken wollte und der für andere Modellnutzer von Bedeutung ist [Kai14, S. 38].

- Bedingung:** *Einem Kostenelement sind kein oder mindestens zwei Elemente durch eine Aggregationsbeziehung zuzuweisen.*
- Bedingung:** *Einem Nutzelement sind kein oder mindestens zwei Elemente durch eine Aggregationsbeziehung zuzuweisen.*
- Richtlinie:** *Die schwarze Raute einer Aggregationsbeziehung zeigt auf das Element, welches die Elemente auf der unteren Hierarchieebene zusammenfasst.*
- Bedingung:** *Die Gewichtungsfaktoren der Aggregationsbeziehung haben einen Wert zwischen 0 und 100 Prozent.*
- Bedingung:** *Die Summe der Gewichtungsfaktoren auf einer Hierarchieebene ist immer 100 Prozent.*
- Bedingung:** *Der Wert eines Kostenelements auf der oberen Hierarchieebene entspricht der Summe aus dem Produkt der aggregierten Kostenelemente und deren Gewichtungsfaktoren.*
- Bedingung:** *Der Wert eines Nutzelements auf der oberen Hierarchieebene entspricht der Summe aus dem Produkt der aggregierten Nutzelemente und deren Gewichtungsfaktoren.*
- Bedingung:** *Einem Wirtschaftlichkeitselement sind mindestens ein Kosten- und ein Nutzelement durch eine Verhältnisbeziehung zuzuweisen.*

- Bedingung:** *Die zweigeteilte Raute einer Verhältnisbeziehung zeigt auf das Wirtschaftlichkeitselement.*
- Bedingung:** *Der Wert des Wirtschaftlichkeitselements entspricht dem Wert des Quotienten der mittels einer Verhältnisbeziehung verbundenen Nutzen- und Kostenelemente.*
- Richtlinie:** *Zwischen zwei Elementen kann zugleich eine verstärkende und eine dämpfende Beziehung bestehen.*
- Bedingung:** *Die Raute einer dämpfenden Beziehung zeigt auf das Element, welches durch eine Veränderung des verbundenen Elements gedämpft wird.*
- Bedingung:** *Die Raute einer verstärkenden Beziehung zeigt auf das Element, welches durch eine Veränderung des verbundenen Elements verstärkt wird.*
- Bedingung:** *Ein Multiplikator hat mindestens eine verstärkende oder dämpfende Beziehung mit einem Element des Wirtschaftlichkeitsmodells.*
- Bedingung:** *Die Raute der verstärkenden oder dämpfenden Beziehung eines Multiplikators zeigt immer auf das Element, welches vom Multiplikator beeinflusst wird.*
- Bedingung:** *Ein Stakeholderelement hat mindestens eine logische Beziehung zu einem Kosten-, Nutzen- oder Wirtschaftlichkeitselement.*
- Bedingung:** *Die Pfeilspitze der logischen Beziehung zeigt auf das Kosten-, Nutzen- oder Wirtschaftlichkeitselement.*

## 4.2 Vorgehensmodell

Die Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme gliedert sich in sechs Phasen. Bild 4-6 gibt einen Überblick über die notwendigen Tätigkeiten und Resultate sowie deren Reihenfolge. Es handelt sich um das idealtypische Vorgehen. In der Praxis ist das Vorgehen jedoch durch Iterationen und Rücksprünge in allen Phasen geprägt. Diese sind ausdrücklich erwünscht, um so eine kontinuierliche Verbesserung der Lösungsvarianten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Konzipierung zu erzielen. Die Systematik ist integraler Bestandteil der disziplinübergreifenden Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Bild 4-7 zeigt die Einordnung der Systematik in den Konzipierungsprozess (vgl. Abschnitt 2.5.6). Die einzelnen Phasen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

**Identifikation von Kosten- und Nutzelementen:** Die Phase ist Bestandteil der Phase *Planen und Klären der Aufgabe* im wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierungsprozess (vgl. Bild 4-7). Als Ausgangspunkt für die Systematik dient der Entwicklungsauftrag, welcher die Entwicklungsaufgabe beschreibt. Vor diesem Hintergrund werden im ersten

Schritt die relevanten Stakeholder mittels *Relevanzanalyse* für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ausgewählt. Diese werden in einer *Auswirkungsmatrix* den Trends aus dem Entwicklungsauftrag gegenübergestellt und anhand der zukünftigen Veränderung Nutzenpotentiale in Anlehnung an PÜMPIN abgeleitet [Püm92, S. 49ff.]. Die identifizierten Nutzenpotentiale werden mittels der Partialmodelle *Umfeld* und *Anwendungsszenarien* in technische Anforderungen übersetzt. Auf Basis des Umfeldmodells lassen sich die Kosten- und Nutzenelemente identifizieren, welche sich aus dem Systemumfeld ergeben. Die Identifikation der Kosten- und Nutzenelemente im Lebenszyklus erfolgt über das Partialmodell *Anwendungsszenarien*. Ein *Leitfaden zur Entwicklung von Anwendungsszenarien* unterstützt das interdisziplinäre Entwicklungsteam. Abschließend lassen sich auf Basis der Anforderungen die funktionsabhängigen Nutzenelemente identifizieren. Ergebnis der Phase sind Stakeholder-, Kosten- und Nutzenelemente für das Wirtschaftlichkeitsmodell.

**Entwicklung des Wirtschaftlichkeitsmodells:** Die Entwicklung des Wirtschaftlichkeitsmodells stellt in der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung eine eigene Phase dar (vgl. Bild 4-7). Der Aufbau des Wirtschaftlichkeitsmodells wird durch die Grundstruktur der Kosten und des Nutzens über den Lebenszyklus unterstützt. Die identifizierten Kosten- und Nutzenelemente werden den ausgewählten Stakeholdern zugeordnet und die Grundstruktur systemspezifisch ausgeprägt. Bei der Erstellung eines plausiblen Modells werden die Entwickler durch die *Richtlinien und Bedingungen zur Modellierung* unterstützt (vgl. Abschnitt 4.1.4). Für die Nutzenelemente des Wirtschaftlichkeitsmodells werden im nächsten Schritt die Gewichtungsfaktoren über eine *Gewichtungsmatrix* ermittelt und im Modell ergänzt. Die Nutzenelemente werden im *Kano-Kategorisierungsportfolio* hinsichtlich der Leistung des bestehenden Systems und den Erwartung des Stakeholders bewertet. Die resultierende Kano-Kategorie wird den Nutzenelementen als Eigenschaften zugewiesen. Im nächsten Schritt wird das Wirtschaftlichkeitsmodell um Multiplikatoren, wie bspw. die *Kundenzufriedenheit*, ergänzt und ihre Abhängigkeiten zu den Elementen beschrieben. Abschließend wird für jedes Nutzenelement der erwartete Nutzen bewertet. Ergebnis der Phase ist das initiale Wirtschaftlichkeitsmodell.

**Bewertung und Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsvariante:** Die Bewertung und Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsvariante erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren im Rahmen der *Konzipierung auf Gesamt- und Subsystemebene* (vgl. Bild 4-7). Zunächst werden die Lösungsvarianten hinsichtlich ihrer Anforderungserfüllung bewertet. Lösungsvarianten, welche die Anforderungen nicht vollumfänglich erfüllen, werden nicht weiterverfolgt. Für die ausgewählte Lösungsvariante wird eine Zielkostenkontrolle durchgeführt und somit ihre Wirtschaftlichkeit überprüft. Hierzu werden die Kombinationen aus Teilfunktionen und Lösungselementen der Lösungsvariante im Zielkostenkontrolldiagramm hinsichtlich ihres Funktionsnutzenbeitrags je Stakeholder und ihrem Funktionskostenbeitrag gegenübergestellt. Das Ergebnis der Kostenbewertung sowie die Gewichtungsfaktoren werden im Wirtschaftlichkeitsmodell dokumentiert. Abschließend erfolgt für die funktions- und gesamtsystemabhängigen Elemente des Wirtschaftlichkeits-

modells für die vorliegende Prinziplösung die Bewertung des erlebten Nutzens, der Multiplikatoren, der Kosten, der Wirtschaftlichkeit sowie des objektiven Nutzens. Ergebnis der Phase ist das initial bewertete Wirtschaftlichkeitsmodell.

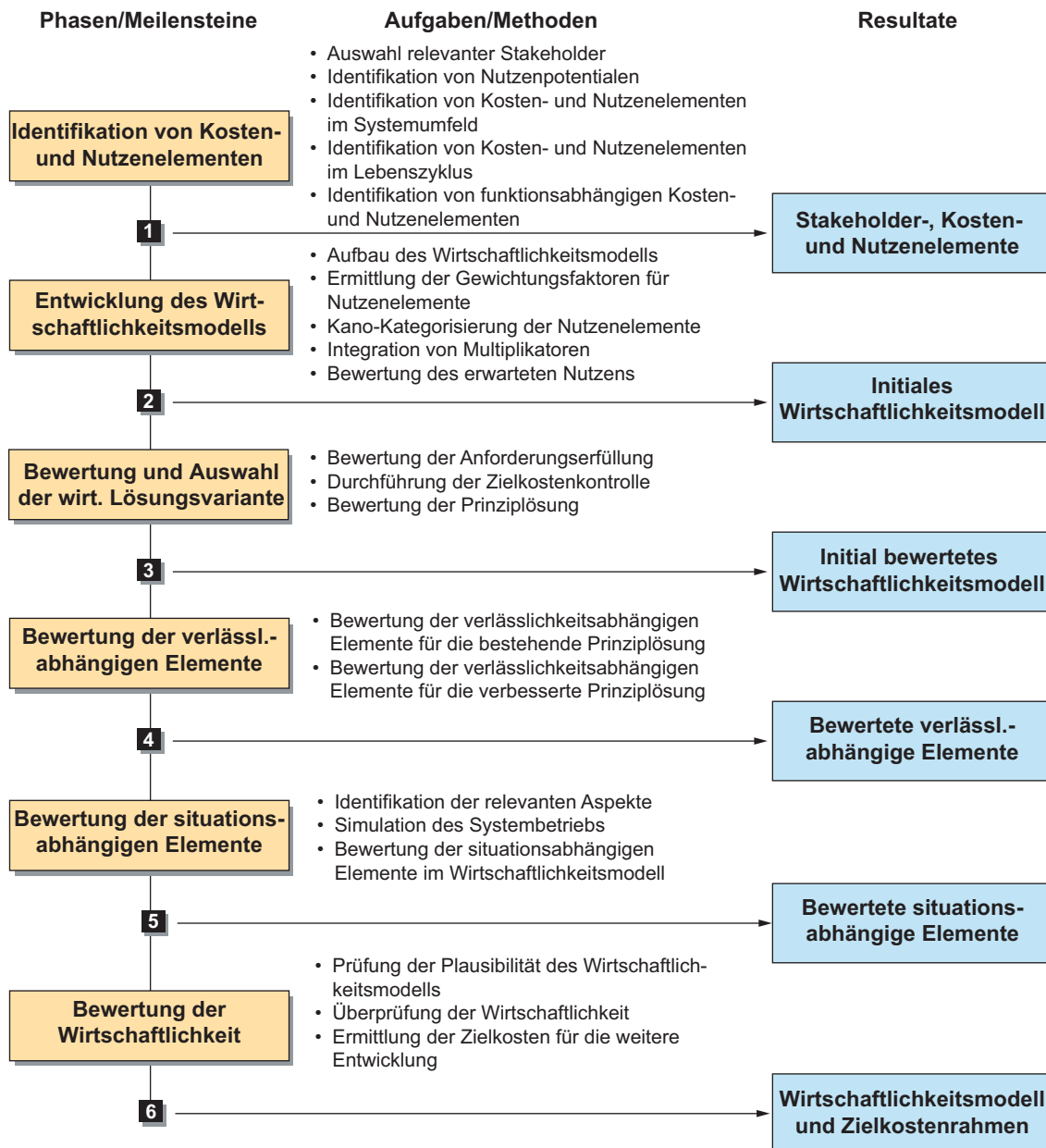


Bild 4-6: Vorgehen zur Entwicklung und Bewertung des Wirtschaftlichkeitsmodells

**Bewertung der verlässlichkeitsabhängigen Elemente:** Die Bewertung erfolgt im Rahmen der *Konzeptintegration* (vgl. Bild 4-7). In dieser Phase wird der Spezialfall der gesamtsystemabhängigen Elemente des Wirtschaftlichkeitsmodells, die verlässlichkeitsabhängigen Elemente in der *Fehlermöglichkeits-, Einfluss- und Fehlerkostenanalyse*<sup>73</sup>

<sup>73</sup> In Englisch: Failure Mode and Effects and Failure Cost Analysis.

(FMEFA) bewertet. Für jeden identifizierten Ausfall werden die unter den *Instandhaltungskosten* aggregierten Kostenelemente sowie die *Gewährleistungs-* und die *Haftungskosten* bewertet. Im nächsten Schritt werden geeignete Gegenmaßnahmen für jeden Ausfall identifiziert und die verbesserte Prinzipiellösung erneut durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam in der FMEFA bewertet. Zudem werden die bis zu diesem Zeitpunkt bewerteten Kostenelemente vor dem Hintergrund der Maßnahmenumsetzung geprüft und ggf. neu bewertet. Auf diese Weise lassen sich Kosteneinsparungen bzw. -steigerungen durch die Steigerung der Verlässlichkeit des Systems aufzeigen. Ergebnis der Phase sind die bewerteten verlässlichkeitsabhängigen Elemente.

**Bewertung der situationsabhängigen Elemente:** Die Bewertung der situationsabhängigen Elemente erfolgt ebenfalls im Rahmen der *Konzeptintegration* (vgl. Bild 4-7) durch Simulation möglicher Betriebsfälle und -situationen mit Hilfe der *Methode zur frühzeitigen Analyse der Systemdynamik*. Hierzu werden zunächst die relevanten Aspekte des Systems identifiziert und das Simulationsmodell erstellt. Die Betriebsfälle werden simuliert und die situationsabhängigen Elemente auf Basis der Simulationsergebnisse bewertet. Ergebnis der Phase sind die bewerteten situationsabhängigen Elemente des Wirtschaftlichkeitsmodells.

**Bewertung der Wirtschaftlichkeit:** In der letzten Phase erfolgt eine Plausibilitätsprüfung des entwickelten Wirtschaftlichkeitsmodells. Anhand einer Checkliste kann das interdisziplinäre Entwicklungsteam die Einhaltung der Bedingungen und Richtlinien zur Modellierung überprüfen. Im nächsten Schritt erfolgt eine abschließende Überprüfung der Wirtschaftlichkeit der Prinzipiellösung. Sind die Ergebnisse für das Entwicklungsteam zufriedenstellend, werden in Anlehnung an das Target Costing (vgl. Abschnitt 3.3.1) den einzelnen Kostenelementen Zielkosten zugewiesen. Ergebnis der Phase ist das plausible Wirtschaftlichkeitsmodell sowie ein Zielkostenrahmen für die weitere Entwicklung. Die Bewertung erfolgt im Rahmen der *Konzeptintegration* und schließt den Konzipierungsprozess ab.



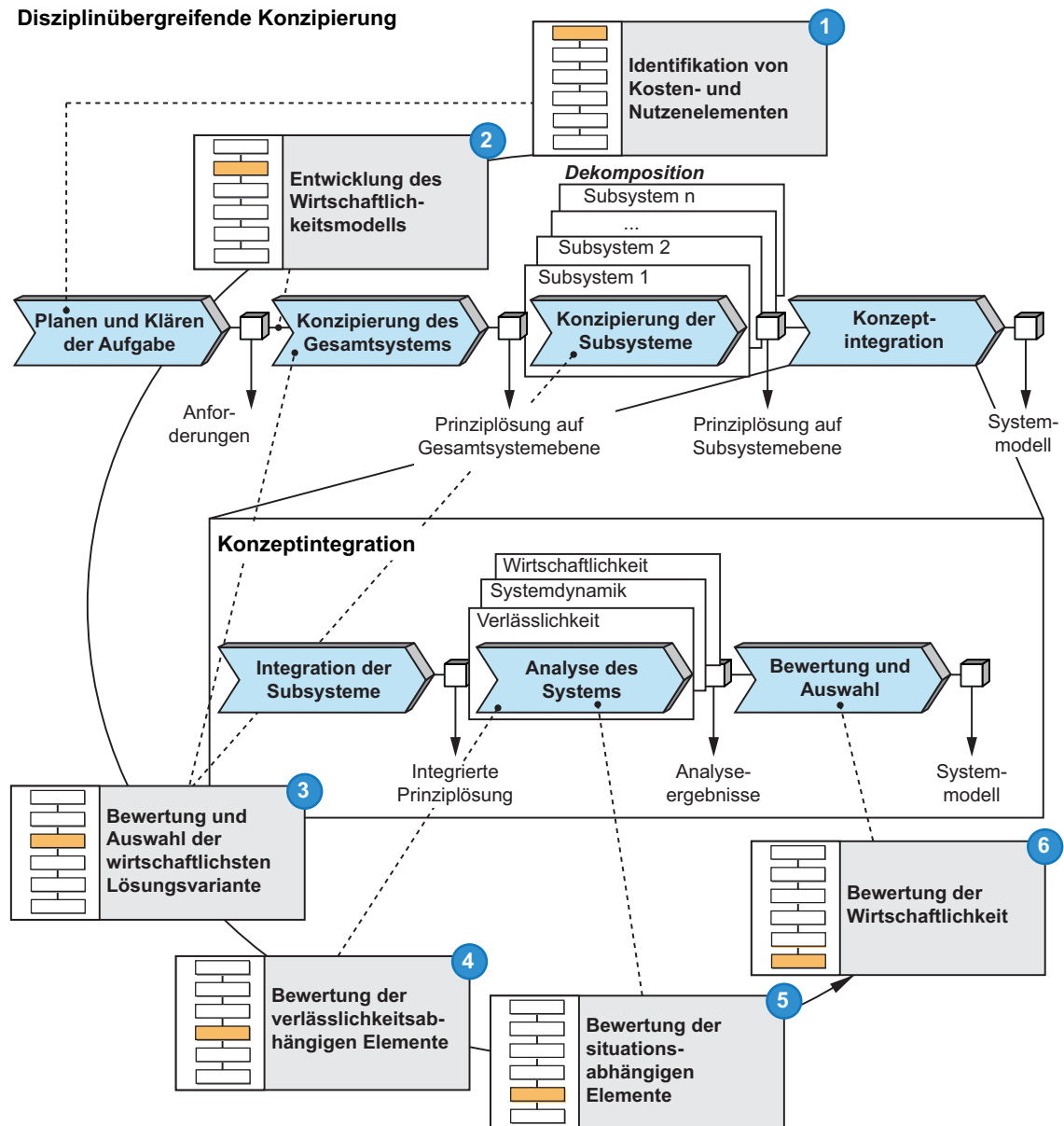


Bild 4-7: Einordnung der Systematik in die disziplinübergreifende Konzipierung nach [GV14b, S. 69ff.]



## 5 Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme

*Der Preis ist, was du zahlst. Der Wert ist, was du bekommst.*

– WARREN BUFFETT

Dieses Kapitel beschreibt die einzelnen Phasen der Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. In Abschnitt 5.1 werden die Kosten- und Nutzenelemente, welche für das System über den Lebenszyklus entstehen identifiziert. Im nächsten Schritt wird das initiale Wirtschaftlichkeitsmodell in Abschnitt 5.2 entwickelt. Es folgt die Bewertung und Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsvariante in Abschnitt 5.3. Für diese Lösungsvariante werden in Abschnitt 5.4 auf Basis einer *Fehlermöglichkeits-, Einfluss- und Fehlerkostenanalyse* (FMEFA) die verlässlichkeitsabhängigen Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell bewertet. Kosten- und Nutzenelemente, welche vom Betrieb des Systems abhängig sind, werden in Abschnitt 5.5 auf Basis eines Simulationsmodells der Systemdynamik bewertet. In Abschnitt 5.6 wird das Wirtschaftlichkeitsmodell auf seine Plausibilität geprüft, die Prinzipiellösung abschließend hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bewertet und der Zielkostenrahmen für die weitere Entwicklung festgelegt. Das Kapitel endet in Abschnitt 5.7 mit einer Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen. Zum besseren Verständnis und zur Validierung des Vorgehens dient das Projekt „Neue Bahntechnik Paderborn“<sup>74</sup>, welches ein neues Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge zum Ziel hat.

### 5.1 Identifikation von Kosten- und Nutzenelementen

Ziel der ersten Phase sind die über den Lebenszyklus entstehenden Kosten- und Nutzenelemente des zu entwickelnden Intelligenten Technischen Systems für das Wirtschaftlichkeitsmodell. Die Identifikation von Kosten- und Nutzenelementen erfolgt im Rahmen der Phase Planen und Klären der Aufgabe des Konzipierungsprozesses. Ausgangspunkt bildet der Entwicklungsauftrag (vgl. Abschnitt 5.1.1). In Abschnitt 5.1.2 werden relevante Stakeholder ausgewählt und für diese Nutzenpotentiale in Abschnitt 5.1.3 identifiziert. Die Kosten und Nutzenelemente werden anhand des Systemumfelds (vgl. Abschnitt 5.1.4), von Anwendungsszenarien (vgl. Abschnitt 5.1.5) sowie der Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.1.6) ermittelt. Ergebnis der Phase sind Stakeholder-, sowie Kosten- und Nutzenelemente für das Wirtschaftlichkeitsmodell.

---

<sup>74</sup> Das in diesem Projekt entwickelte Schienenfahrzeug RailCab diente als Demonstrator im Sonderforschungsbereich 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ der Universität Paderborn (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die vorliegende Arbeit wurde im Kontext des Sonderforschungsbereichs 614 erarbeitet. Die Validierung erfolgte retrospektiv am bestehenden System.

### 5.1.1 Ausgangspunkt: Entwicklungsauftrag

Ausgangspunkt für die Identifikation von Kosten- und Nutzenelementen ist der Entwicklungsauftrag. Er wird von der strategischen Produktplanung erarbeitet, von der Unternehmensführung erteilt und beschreibt die Entwicklungsaufgabe. Der Entwicklungsauftrag liefert neben einer Kurzbeschreibung des zu entwickelnden Intelligenten Technischen Systems und einer Skizze entwicklungsrelevantes Wissen aus der strategischen Produktplanung [WDG14, S. 124ff.].

Bild 5-1 zeigt den Entwicklungsauftrag für ein autonomes Schienenfahrzeug RailCab als Teil eines zukunftsfähigen Mobilitätskonzepts. Laut **Kurzbeschreibung** fährt es nach Bedarf und nicht nach Fahrplan. Als Intelligentes Technisches System kann es mit dem Benutzer und der Umwelt interagieren und sich selbstständig an Veränderungen in seinem Umfeld anpassen. Wie die **Skizze** zeigt, ist das RailCab eingebettet in ein Mobilitätskonzept, welches verschiedene Transportmittel vernetzt.

In der vorangegangenen strategischen Produktplanung wurden nach GAUSEMEIER ET AL. im Rahmen der Potentialfindung zukünftige Erfolgspotentiale und Handlungsoptionen für die Bahntechnik ermittelt. Im vorliegenden Beispiel konnten durch Expertenbefragungen mit Hilfe der Delphi-Methode<sup>75</sup> **Trends** für die Bahntechnik ermittelt und analysiert<sup>76</sup> werden. Hierbei wurden Studien vom „*Münchener Kreis e.V.*“, der „*Deutschen Bahn*“, dem „*Verband der Bahnindustrie in Deutschland e.V.*“ sowie Unternehmensberatungen wie „*Roland Berger*“ herangezogen. Diese Trends wurden mit Hilfe einer Relevanzanalyse<sup>77</sup> bewertet und auf 27 relevante Trends reduziert. Die Ergebnisse der Trendanalyse<sup>78</sup> liegen als Trendradar und in Form von Steckbriefen vor; sie ergänzen die Entwicklungsaufgabe (vgl. Anhang A2.1).

Darüber hinaus wurden 23 **Stakeholder**<sup>79</sup> für das neue Mobilitätskonzept ermittelt. Hierzu zählen neben den Reisenden, bspw. auch die Mitarbeiter und Führungskräfte der Neuen Bahntechnik Paderborn AG (NBP AG) sowie die Betreibergesellschaft RailCab AG (RC AG).

---

<sup>75</sup> Bei der Delphi Methode wird eine Gruppe von Fachexperten nach ihrer Einschätzung der Zukunft befragt. Sie liefert besonders aussagekräftige Ergebnisse bei langfristigen und allgemeinen Fragestellungen mit einem Prognosezeitraum über 10 Jahre [GP14, S. 88f.].

<sup>76</sup> Methoden zur Trendanalyse liefern u.a. [GP14, S. 90ff.], [HHS+07, S. 64ff.], [Pil07, S. 138ff.], [FS06, S. 127ff.] und [KH99, S. 55ff.].

<sup>77</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2. Fragestellung im vorliegenden Anwendungsfall: „Ist der Trend in der Zeile wichtiger als der Trend in der Spalte für die Bahntechnik?“

<sup>78</sup> Eine Übersicht über die relevanten Trends sowie die Einordnung in das Trendradar gibt Anhang A2.1.

<sup>79</sup> Methoden zur Stakeholderanalyse liefern u.a. [FS06, S. 179ff.], [GP14, S. 150ff.], [ML11, S. 160ff.] und [MAW97, S. 865ff.].

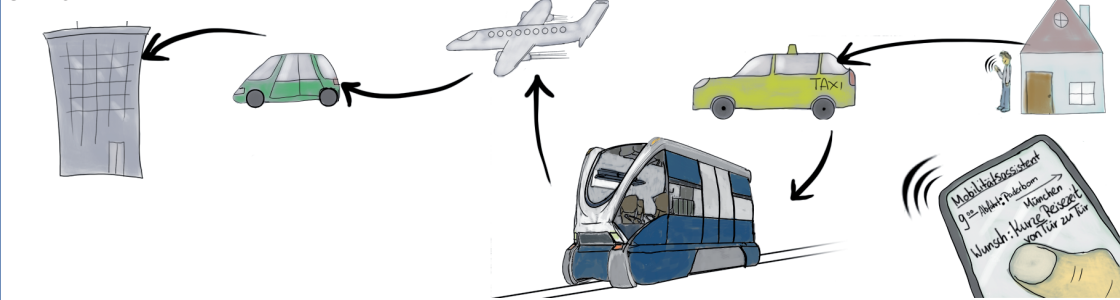
## Entwicklungsauftrag Autonomes Schienenfahrzeug „RailCab“

### Kurzbeschreibung

Das autonome Schienenfahrzeug „RailCab“ ist Teil eines zukunftsfähigen Mobilitätskonzepts, dass dem Wunsch der Kunden nach Individualität, Flexibilität und Privatsphäre gerecht wird. Der Kunde wird zukünftig wie selbstverständlich mit Hilfe eines mobilen Mobilitätsassistenten seine optimale individuelle Transportkette hinsichtlich Transportmittel, Zeit, Kosten und Ressourcenverfügbarkeit zusammenstellen. Teil dieser Transportkette ist das autonome Schienenfahrzeug RailCab.

Das RailCab fährt nach Bedarf und nicht nach Fahrplan. Es passt sich automatisch an die Bedürfnisse des Kunden und die Umgebungsbedingungen an. Als Intelligentes Technisches System kann es so jederzeit einen optimalen und ressourcenschonenden Betrieb gewährleisten. Auf langen Strecken kann es Konvois bilden, um Energie zu sparen. Hierbei kann es nicht nur Personen, sondern mit der entsprechenden Ausstattung auch Güter transportieren. Durch eine intelligente Verknüpfung mit anderen Verkehrsmitteln lässt sich ein reibungsloser Transport von Personen und Gütern „von Tür zu Tür“ auch über Ländergrenzen hinweg realisieren.

### Skizze



### Trends (Auszug)

- Steigende Umwelt- und Klimaschutzanforderungen (T1)
- Weltweit wachsende Ballungsräume („Megacities“) (T2)
- Zunehmende Globalisierung der Weltwirtschaft (T3)
- Zunehmende Liberalisierung und Deregulierung des Schienenverkehrs (T4)
- Zunehmende Interoperabilität des Schienenverkehrs in Europa (T5)
- ...

Quelle: [VDB13]

### Stakeholder (Auszug)

- Reisende im Personenverkehr (S1)
- Hersteller Neue Bahntechnik Paderborn AG (S2)
- Transportunternehmen (S3)
- ...
- Presse (S22)
- Betreibergesellschaft RailCab AG (S23)

Quelle: [DB13-01]

### Kundenanforderungen

- Zeit für andere Aktivitäten (KA1)
- Von-Tür-zu-Tür Flexibilität (KA 2)
- High Tech und 1. Klasse Komfort (KA 3)
- Umweltfreundlich durch die Stadt (KA 4)
- Entspannend und Sorglos (KA 5)
- Pragmatischer Transport (KA 6)

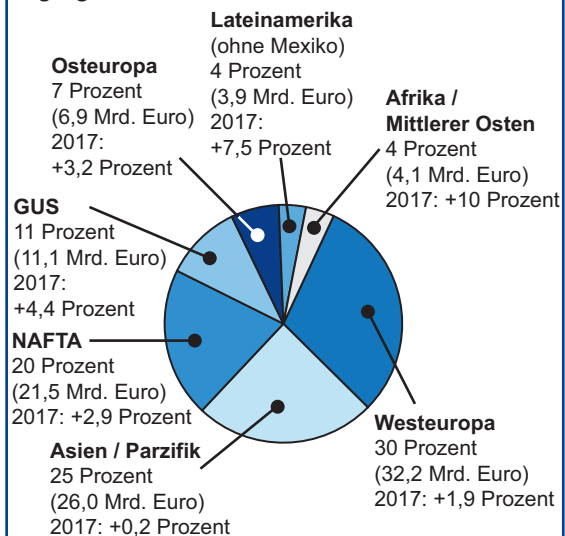
Quelle: [MED+13]

### Markteinschätzung Bahntechnik (weltweit)

Marktvolumen 2011: 105,7 Mrd. Euro

Marktwachstum bis 2017: +2,7 Prozent pro Jahr

**Zugänglicher Weltmarkt für Bahntechnik 2011:**



NAFTA = North American Free Trade Agreement  
GUS = Gemeinschaft Unabhängiger Staaten

Quelle: [VDB13]

### Zielkosten

- Zielpreis: max. 360.000 Euro pro RailCab
- Zielgewinn: 10 Prozent vom Zielpreis pro RailCab
- Kosten pro Sitzplatz: ca. 36.000 Euro (Vergleich ICE 50.000 Euro pro Sitzplatz)
- Instandhaltungs- und Wartungskosten: max. 1.300 € pro Jahr und RailCab
- Energiekosten: max. 4.000 Euro pro RailCab und Jahr
- Nutzungsdauer: 25 Jahre

### Zieltermin

- Abschluss der Konzeptphase: 30. Oktober 2014
- Inbetriebnahme: 1. September 2025

Bild 5-1: Entwicklungsauftrag für ein neues Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge

Zur Ermittlung der zukünftigen **Kundenanforderungen**<sup>80</sup> wurde vom „*Münchener Kreis e.V.*“ eine internationale qualitative Nutzerbefragung durchgeführt. Hierbei wurden von Experten zusammengestellte Nutzenaspekte, die aus den identifizierten Trends resultieren, von den 7.278 Befragten anhand eines Fragebogens bewertet. Auf Basis der Ergebnisse wurden Innovationsfelder ermittelt und Anforderungen abgeleitet [MED+13, S. 21ff.]. Die Ergebnisse der Stakeholderanalyse und die Kundenanforderungen reichern den Entwicklungsauftrag ebenfalls an (vgl. Anhang A2.2 und A2.3).

Darüber hinaus liefert der Entwicklungsauftrag eine weltweite **Markteinschätzung** für Bahntechnik. Die dargestellten Ergebnisse sind das Resultat einer Marktstudie in der Marktvolumina, Marktwachstum sowie das Wachstumspotential für die Bahntechnik identifiziert wurden [Ver13, S. 4]. Für ein neues Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge wird ein hohes Marktpotential prognostiziert.

**Zielkosten**<sup>81</sup> sowie **Zieltermine** runden den Entwicklungsauftrag ab. Die Zielkosten geben den Kostenrahmen für die wirtschaftlichkeitsorientierte Konzipierung vor. Zur besseren Handhabbarkeit wird im Folgenden nur die Konzipierung des RailCabs für den Personentransport ohne die zugehörige Infrastruktur betrachtet. Auf Basis des Entwicklungsauftrags werden die relevanten Stakeholder für die weitere Betrachtung ausgewählt.

### 5.1.2 Auswahl relevanter Stakeholder

Der Entwicklungsauftrag liefert interne und externe Stakeholder die in Zusammenhang mit dem neuen Mobilitätskonzept stehen (vgl. Abschnitt 5.1.1). Ziel dieses Schritts sind relevante Stakeholder für das Wirtschaftlichkeitsmodell. Wie in Bild 5-2 dargestellt, wird hierzu eine Relevanzanalyse durchgeführt. Diese basiert auf einem paarweisen Vergleich der Stakeholder unter der Fragestellung: Wird dem Stakeholder i (Zeile) durch das neue Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge voraussichtlich mehr Nutzen gestiftet als dem Stakeholder j (Spalte)? Nach GAUSEMEIER ET AL. wird lediglich eine Richtung binär bewertet (0 = nein/1 = ja); die zweite ergibt sich aus der invertierten ersten Bewertung [GP14, S. 53].

Die kritische Grenze der Relevanzsumme, die als Auswahlkriterium für die Stakeholder gilt, ist durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam festzulegen. Im Validierungsbeispiel wurde diese auf eine Relevanzsumme von 20 festgelegt und drei Stakeholder zur

---

<sup>80</sup> Zur Segmentierung von Kunden und zur Ableitung von Kundenanforderungen können im Rahmen der strategischen Produktplanung u.a. die Ansätze nach [KB01, S. 415ff.] und [Bri10, S. 102ff.] sowie bestehende Kundensegmente, wie Sinus-Milieus des „*Sinus Instituts*“ [SI13-ol] oder der VALS-Ansatz (Values and Lifestyles) des „*Stanford Research Instituts*“ [SBI14-ol] eingesetzt werden.

<sup>81</sup> Die Zielkostenvorgaben im Validierungsbeispiel für das RailCab entsprechen vom Verhältnis den Vorgaben der Systemstrategie RailCab aus dem Projekt Neue Bahntechnik Paderborn. Da diese nicht öffentlich ist, wurden aus Gründen der Geheimhaltung die Werte verändert.

weiteren Betrachtung ausgewählt. Hierzu zählen neben dem Hersteller des Schienenfahrzeugs *Neue Bahntechnik Paderborn AG* (NBP AG) auch die *Betreibergesellschaft RailCab AG* (RC AG) sowie die *Reisenden*, welche das neue Mobilitätskonzept nutzen werden. Diese Stakeholder stehen in direktem Zusammenhang mit dem zu entwickelnden System. Die ausgewählten Stakeholder werden, wie Bild 5-2 zeigt, als Stakeholderelemente im Wirtschaftlichkeitsmodell abgebildet.

Relevanzmatrix										
<b>Fragestellung:</b> Wird dem Stakeholder i (Zeile) durch das neue Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge voraussichtlich mehr Nutzen gestiftet als dem Stakeholder j (Spalte)?  <b>Bewertungsmaßstab:</b> 0 = i ist unwichtiger als j 1 = i ist wichtiger als j										
Stakeholder	Nr.	1	2	3	4	5	6	7		Relevanzsumme
Reisende im Personenverkehr	1		0	0	1	1	1	1	1	20
Hersteller NBP AG	2	1		1	1		1	1	0	20
Transportunternehmen	3									
Infrastruktur	4									
Politik	5									
Behörden	6									
Mitarbeiter der NBP AG	7	0	0	0	0	0	0		1	10
Betreibergesellschaft RC AG	23	1	1	1	1	1	1	1		22

**Beispiel**

1 = Reisenden im Personenverkehr (Zeile 1) wird durch das neue Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge mehr Nutzen gestiftet als der Politik (Spalte 5).

**Resultat:**

- Neue Bahntechnik Paderborn AG
- RailCab AG
- Reisende

Bild 5-2: Relevanzanalyse der Stakeholder

### 5.1.3 Identifikation von Nutzenpotentialen

Für die ausgewählten Stakeholder werden in diesem Schritt in Anlehnung an PÜMPIN Nutzenpotentiale<sup>82</sup> identifiziert (vgl. Abschnitt 3.2.1). Diese sollen das zu entwickelnde System von denen am Markt differenzieren und so eine Nutzeninnovation ermöglichen (vgl. [KM05, S. 11ff.]).

Die systematische Analyse der Auswirkungen auf den Stakeholder durch das Eintreten der Trends erfolgt in Anlehnung an die Wirkungsanalyse der Szenario-Technik nach GAUSEMEIER ET AL. [GP14, S. 75ff.]. Bei der Ermittlung der zukünftigen Auswirkungen

<sup>82</sup> Die Konzipierung bildet die Schnittstelle zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 2.1.1). Das Vorgehen zur Identifikation von Nutzenpotentialen kann im Rahmen der Potentialfindung bereits in der strategischen Produktplanung eingesetzt werden. Liegen bereits Nutzenpotentiale vor, entfällt dieser Schritt im Rahmen der Konzipierung.

werden vom interdisziplinären Entwicklungsteam kreative und analytische Fähigkeiten gefordert. Für jeden Stakeholder hat das Team folgende Frage zu beantworten: „Wie wirken sich die relevanten Trends auf den Stakeholder aus?“ (vgl. Bild 5-3).







Die Entwickler müssen sich hierbei intensiv in den Stakeholder hineinversetzen und für jeden relevanten Trend oder deren Kombination analysieren, welche Auswirkungen auf dessen Umfeld und somit auf das Verhalten des Stakeholders resultieren. Bei diesem Schritt handelt es sich um eine kognitive Leistung der Entwickler, für die sich folgendes Vorgehen bewährt hat. Die Trends werden nicht der Reihe nach dem Stakeholder gegenüber gestellt, sondern die Entwickler beginnen mit dem Trend, welcher für sie am greifbarsten ist. Auf diese Weise wird die Kreativität des interdisziplinären Entwicklungsteams optimal ausgeschöpft. Anregungen für die Ableitung der Nutzenpotentiale können den Entwicklern, die im Rahmen der strategischen Produktplanung, ermittelten Kundenanforderungen geben (vgl. Anhang A2.3).

Für jeden relevanten Trend formuliert das Entwicklungsteam auf Basis der Trendbeschreibung die Wirkung des Trends auf das Stakeholderfeld kurz und prägnant. Für den Trend *Divergente Entwicklung der Realeinkommen* kann die Trendwirkung wie folgt beschrieben werden: *Die Einkommensschere geht weiter auf*. Die Trendwirkung wird nun von den Entwicklern auf den betrachteten Stakeholder übertragen und die Auswirkungen auf dessen Verhalten abgeleitet. Im Validierungsbeispiel ergeben sich durch diesen Trend zwei Auswirkungen für den Stakeholder „*Reisende im Personenverkehr*“. Zum einen gibt es Privatreisende mit einem geringen Einkommen, die möglichst kostengünstig reisen möchten. Zum anderen gibt es Reisende mit einem hohen Einkommen, für die der Fahrpreis irrelevant ist und eher die Befriedigung ihrer sonstigen Bedürfnisse im Vordergrund steht, wie z.B. möglichst komfortabel zu reisen. Anhand der Auswirkungen lassen sich im letzten Schritt die Nutzenpotentiale ableiten, die es durch die Prinzipiellösung zu erschließen gilt.

Aus dem zuvor beschriebenen Beispiel resultiert das Nutzenpotential *Flexibler Fahrpreis* und *Hoher Komfort* für das neue Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge RailCab. Zum Abschluss der Phase werden die identifizierten Nutzenpotentiale in einer Liste gesammelt (vgl. Tabelle 5-1).

Es ist zu prüfen, ob Nutzenpotentiale, den gleichen Sachverhalt beschreiben und daher gleich zu benennen sind. Abschließend werden Doppelungen eliminiert und die Nutzenpotentiale nummeriert. Im Validierungsbeispiel wurden insgesamt 44 Nutzenpotentiale für das neue Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge identifiziert. Tabelle 5-1 zeigt einen Auszug aus der Liste der identifizierten Nutzenpotentiale, welche durch die Prinzipiellösung des Intelligenten Technischen Systems in der Konzipierung erschlossen werden und so Nutzen für die Stakeholder stiften.



Stakeholder	Trend	Trendwirkung auf das Stakeholderfeld	Auswirkung auf den Stakeholder	Nutzenpotential
Reisende im Personenverkehr      	Divergente Entwicklung der Realeinkommen (T22)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einkommensschere geht weiter auf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privatreisende mit geringem Einkommen möchten möglichst kostengünstig reisen</li> <li>Für Privatreisende mit hohem Einkommen ist der Fahrpreis weniger relevant, ihnen sind bspw. Komfortaspekte wichtiger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexibler Fahrpreis</li> <li>Hoher Komfort</li> </ul>
	Zunahme von Informations- und Telekommunikationslösungen (T16)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zunahme von Informations- und Telekommunikationslösungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privatreisende möchten ihr Transportmittel mit denen von ihnen als selbstverständlich angesehenen Informations- und Telekommunikationslösungen, wie bspw. Smartphones, über das Internet steuern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interaktion von Reisenden (Kunden) und Schienenfahrzeug über das Internet</li> </ul>
	Zunehmende Globalisierung der Weltwirtschaft (T3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zunahme der Mobilität von Arbeitskräften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privatreisende haben längere Strecken zur Arbeit zurück zu legen, häufig auch länderübergreifend; Pendeln ist sehr zeitintensiv</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mobile Arbeitsplätze</li> </ul>
	Zunehmende Flexibilisierung (T24)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zunehmende Forderung nach Flexibilität im Arbeits- und Berufsleben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privatreisende fordern, dass ihre Transportmittel sie bei der Realisierung der geforderten Flexibilität unterstützen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexible Reiseroute</li> <li>Flexible Reisedauer</li> </ul>
	Steigende Umwelt- und Klimaschutzanforderungen (T1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohes Bewusstsein der Menschen für Umwelt- und Klimaschutz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privatreisende legen bei der Wahl des Transportmittels großen Wert darauf, dass die Ressourcen optimal eingesetzt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umweltschonender Betrieb</li> <li>Klimaschonender Betrieb</li> </ul>
	Zunehmende Individualisierung (T25)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Individualisierte Lebensgewohnheiten und -ziele</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privatreisende fordern Transportmittel, die sich an ihre individuellen Lebensgewohnheiten und -ziele anpassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrt nach Bedarf</li> </ul>
	Zunehmende Interoperabilität des Schienenverkehrs in Europa (T5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schienenverkehr auch Ländernübergreifend möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vermehrte Nutzung des Schienenverkehrs für Reisen in das Europäische Ausland</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Europaweite Vernetzung der Betreibergesellschaften</li> </ul>
	Steigende Treibstoffpreise und Ressourcenverknappung (T6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kosten für den Individualverkehr (Auto etc.) steigen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privatreisende steigen auf ressourcenschonende Verkehrsmittel um, sofern diese dieselben Eigenschaften wie der Individualverkehr realisieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Öffnung des Marktes für Individualverkehr</li> <li>Ressourceneffizienter Betrieb</li> </ul>
	Steigende Zuverlässigkeit der Verkehrsmittel (T6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zuverlässigkeit der Verkehrsmittel nimmt weiter zu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privatreisende legen immer mehr Wert auf die Zuverlässigkeit der Verkehrsmittel, Ausfälle oder Verspätungen werden nicht gerne gesehen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Steigerung der Zuverlässigkeit der Schienenfahrzeuge</li> </ul>
Betreiber-gesellschaft	Zunehmend energieeffizienter Betrieb (T7)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Neue Bahntechnik ermöglicht effizienten Betrieb der Schienenfahrzeuge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betreiber-gesellschaft steigt auf neue Schienenfahrzeuge um</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Betriebskosten</li> </ul>

Bildquelle: Fotolia (www.fotolia.de)

Bild 5-3: Auswirkungsmatrix zur Ermittlung der Nutzenpotentiale (Auszug)

Tabelle 5-1: Liste der identifizierten Nutzenpotentiale (Auszug)

Nutzenpotentiale für ein neues Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge (RailCab)	
Nr.	Bezeichnung
1	Ausdehnung des Angebots der Betreibergesellschaft auf die Stadt
2	Durchgängige Transportketten
3	Eigenständige Mobilität bis ins hohe Alter
4	Einfachere Zulassung neuer Systeme
9	Fahrt nach Bedarf/Flexible Fahrpläne
10	Flexible Fahrpreise
11	Flexible Reisedauer
12	Flexible Reisegruppengröße
13	Flexible Reiseroute
44	Vernetzung mit weiteren Verkehrsmitteln

#### 5.1.4 Identifikation von Kosten- und Nutzelementen im Systemumfeld

Die Identifikation von Kosten- und Nutzelementen im Systemumfeld erfolgt in diesem Schritt im Rahmen der Umfeldanalyse des Konzipierungsprozesses. Bei der Analyse des Umfelds<sup>83</sup> wird die Einbettung des zu entwickelnden Intelligenten Technischen Systems als Black-Box in sein Umfeld analysiert (vgl. Bild 5-4).

Die Ergebnisse der Umfeldanalyse werden mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. Abschnitt 2.5.6) im Umfeldmodell visualisiert. Bild 5-4 zeigt einen Auszug aus dem Umfeldmodell des RailCab. Das RailCab wird als Systemelement in der Mitte platziert und die Elemente des Umfelds bestimmt, mit denen es interagiert oder von denen es beeinflusst wird. Die Beziehungen zwischen dem System und den Umfeldelementen lassen sich als Stoff-, Informations- und Energiebeziehung sowie als logische Beziehung darstellen. Es ist sicherzustellen, dass neben den technisch relevanten Schnittstellen, wie bspw. der Energieversorgung, alle Schnittstellen nach außen vorgesehen werden, die zur Erschließung der zuvor identifizierten Nutzenpotentiale notwendig sind. Im Validierungsbeispiel konnte anhand des Nutzenpotentials *Vernetzung mit anderen Verkehrsmitteln* das Umfeldelement *weitere Verkehrsmittel* identifiziert werden.

<sup>83</sup> Für eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens bei der Umfeldanalyse sei auf [Fra06, S. 105f.] und [GLL12, S. 91f.] verwiesen.

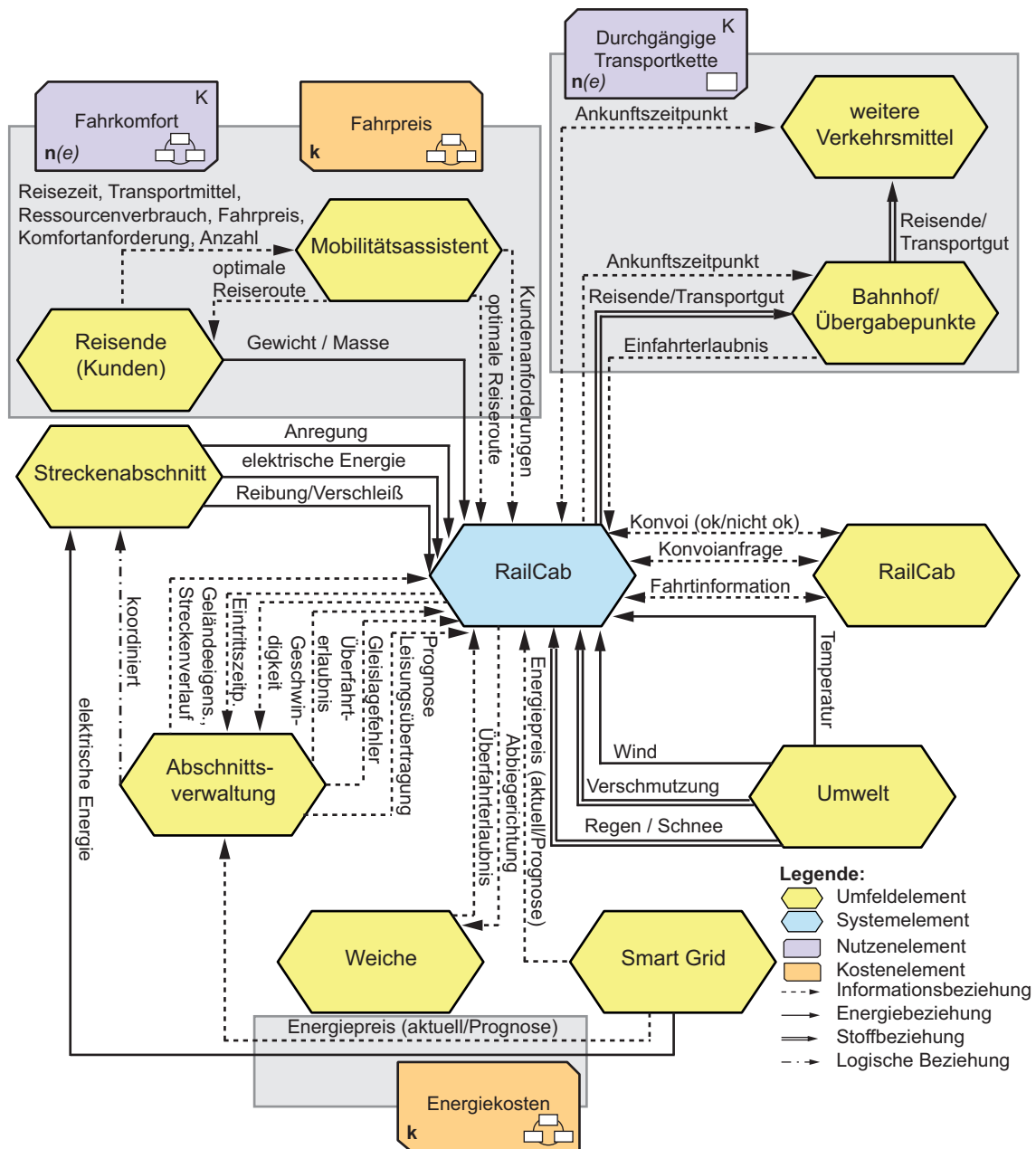


Bild 5-4: Umfeldmodell des RailCabs und die darin identifizierte Kosten- und Nutzelemente (Auszug)

Auf Basis des Umfeldmodells kann das interdisziplinäre Entwicklungsteam abschließend Kosten- und Nutzelemente identifizieren, welche sich aus dem Systemumfeld ergeben. Bei diesem Schritt handelt es sich um eine kognitive Leistung des interdisziplinären Entwicklungsteams. Wie Bild 5-4 zeigt wurden als Kostenelemente u.a. der *Fahrpreis* oder *Energiekosten* und als Nutzelemente *durchgängige Transportketten*, *Fahrkomfort* etc. identifiziert.

### 5.1.5 Identifikation von Kosten- und Nutzelementen im Lebenszyklus

Die Identifikation von Kosten- und Nutzelementen über den Lebenszyklus erfolgt mittels Anwendungsszenarien. Sie charakterisieren das gewünschte Verhalten des Intelligen-ten Technischen Systems in verschiedenen Situationen über den Lebenszyklus. Sie be-schreiben Betriebssituationen und spezifizieren die gewünschte Verhaltensart und -weise des Systems in einer Situation bzw. in einem Zustand. Anwendungsszenarien eignen sich daher zur Identifikation der Kosten- und Nutzelemente im Lebenszyklus. Anwen-dungsszenarien unterstützen die Entwickler die identifizierten Nutzenpotentiale (vgl. Ab-schnitt 5.1.3) in technische Anforderungen zu übersetzen. Im Rahmen der Arbeit wurde ein Vorgehen zur Definition<sup>84</sup> von Anwendungsszenarien für die wirtschaftlichkeitsori-entiertere Konzipierung entwickelt. Der *Leitfaden zur systematischen Definition von An-wendungsszenarien über den Lebenszyklus* unterstützt das interdisziplinäre Entwick-lungsteam bei der Definition von Anwendungsszenarien und liefert eine systematische Vorgehensweise (vgl. Bild 5-5).

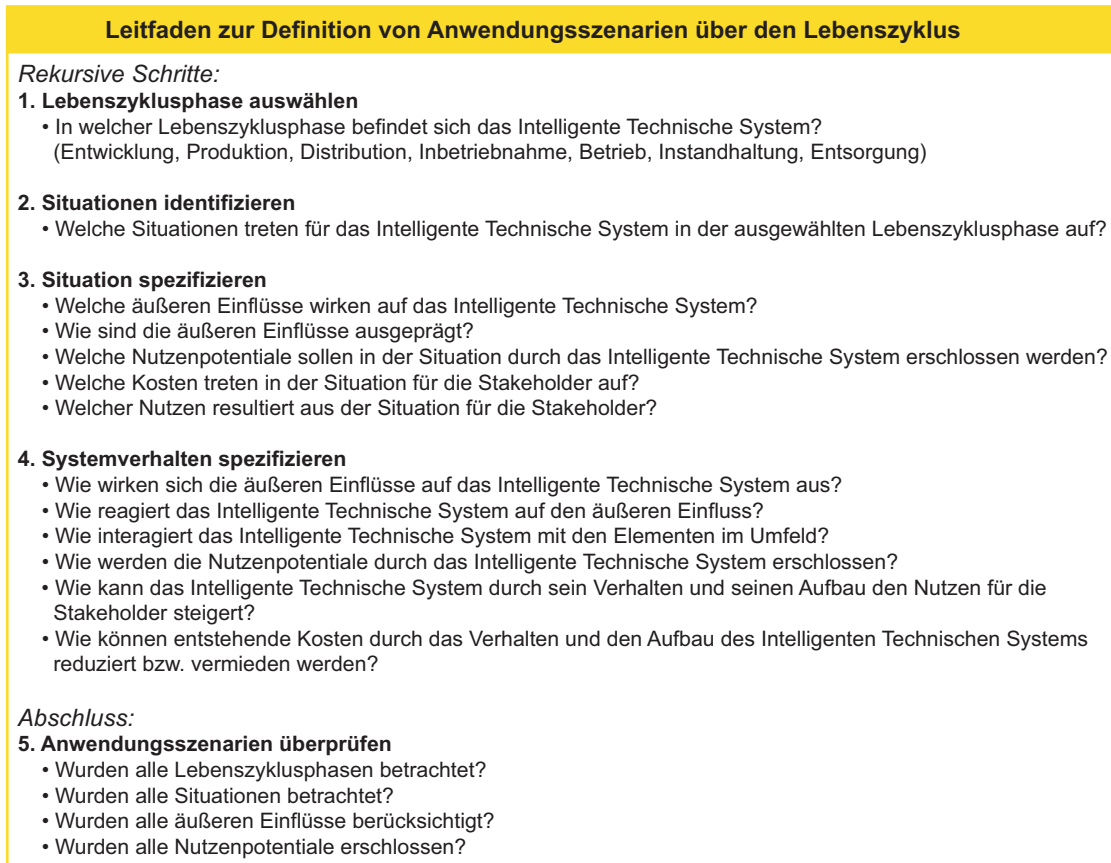
Die Schritte 1 bis 4 des Leitfadens sind rekursiv zu durchlaufen. Das bedeutet: Zunächst ist eine Lebenszyklusphase auszuwählen. Für diese Lebenszyklusphase werden verschie-dene Situationen identifiziert, in denen sich das Intelligente Technische System befinden kann. Jede identifizierte Situation wird dann weiter spezifiziert und das Systemverhalten definiert. Die Ergebnisse werden wie in Bild 5-6 dargestellt im Partialmodell Anwen-dungsszenarien dokumentiert.

Das Vorgehen wird für alle identifizierten Betriebssituationen innerhalb der Lebenszyk-lusphase durchgeführt; dann wird die nächste Lebenszyklusphase ausgewählt und das Vorgehen wiederholt. Abschließend wird überprüft, ob alle relevanten Situationen be-rücksichtigt wurden. Die Anwendung des Leitfadens wird im Folgenden beispielhaft er-läutert.

Im ersten Schritt wird die Lebenszyklusphase *Betrieb* ausgewählt. Für diese identifiziert das interdisziplinäre Entwicklungsteam verschiedene Betriebssituationen wie bspw. *Kos-tengünstig von Tür-zu-Tür bei hohen prognostizierten Energiepreisen*, *Energieeffizienter Betrieb* und *Sicherheitskritischer Betrieb*. Als Unterstützung kann hierbei die Hauptmerk-malsliste für den Produktlebenszyklus dienen [FGN+13, S. 331].

---

<sup>84</sup> Vgl. Anwendungsszenarien nach FRANK [Fra06, S. 106ff.] sowie die Weiterentwicklung nach GAUSE-MEIER ET AL. [GLL12, S. 92].



*Bild 5-5: Leitfaden zur systematischen Definition von Anwendungsszenarien über den Lebenszyklus*

Im nächsten Schritt wird die Betriebssituation *Kostengünstig von Tür-zu-Tür bei hohen prognostizierten Energiepreisen* ausgewählt und spezifiziert. Hierzu werden Einflüsse aus dem Umfeld und deren Ausprägung in der Situation definiert und dokumentiert (vgl. Bild 5-6). In der betrachteten Situation hat u.a. der Einfluss *Fahrpreis* die Ausprägung *minimieren* sowie *Prognose des Energiepreis* die Ausprägung *hoher Energiepreis*. Auf Basis der Einflüsse werden die Betriebssituation und das gewünschte Systemverhalten in Prosa beschrieben.

Der Forderung nach einem möglichst geringen Fahrpreis wird das RailCab nachkommen, indem es seinen Energiespeicher mit „günstiger“ Energie speist oder mit anderen RailCabs interagiert, um Konvois zu bilden und so die Energiekosten gering zu halten. Eine Skizze rundet die Beschreibung des Systemverhaltens ab. Darüber hinaus werden die in der beschriebenen Situation erschlossenen Nutzenpotentiale dokumentiert.

Auf Basis der beschriebenen Situation und dem zugehörigen Systemverhalten lassen sich Kosten- und Nutzelemente für das Wirtschaftlichkeitsmodell identifizieren. Einen Anhaltspunkt für Kosten in den einzelnen Lebenszyklusphasen gibt die VDI-Richtlinie 2884 [VDI2884, S. 12ff.]. Die Elemente werden ebenfalls im Anwendungsszenario dokumentiert.

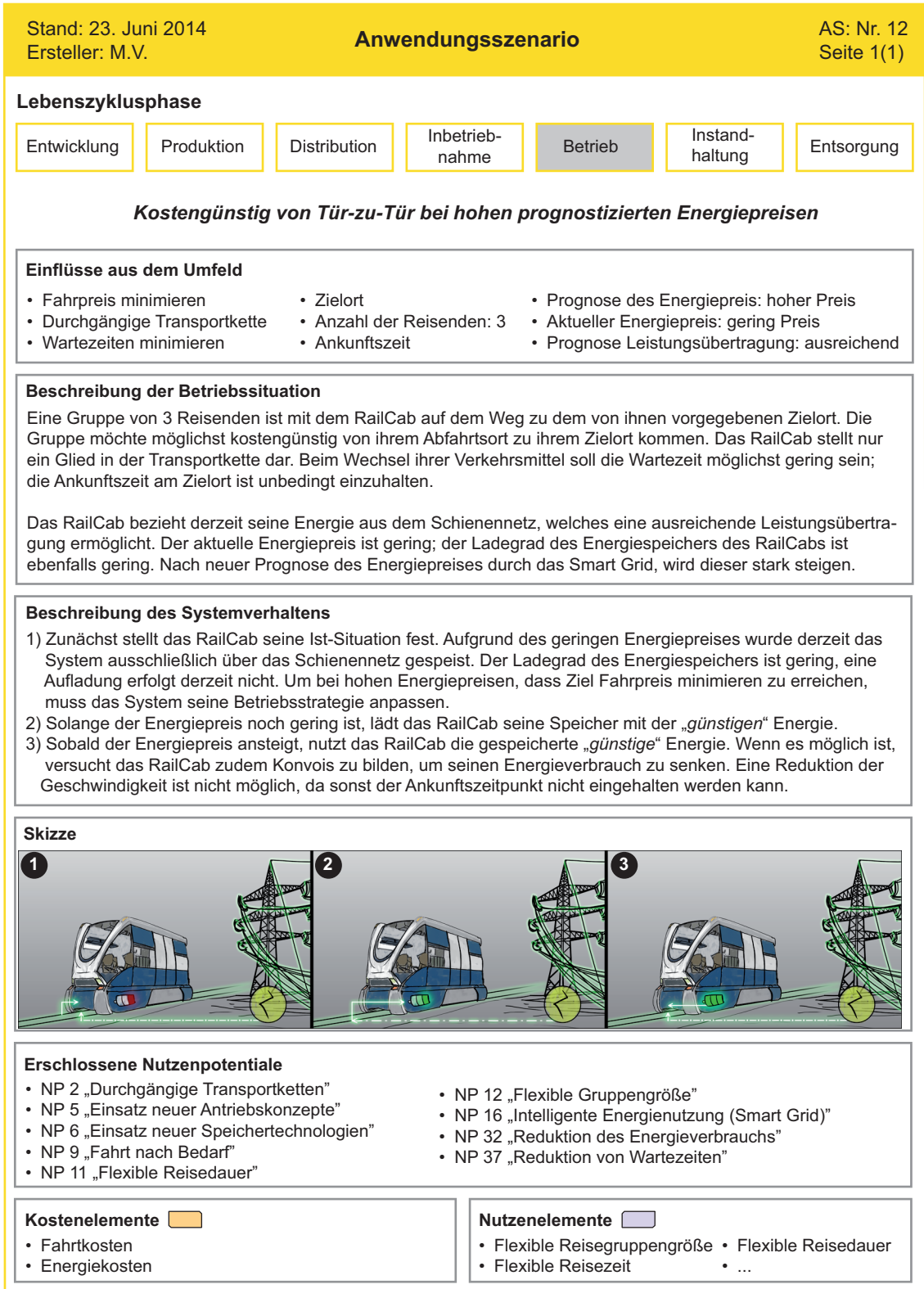


Bild 5-6: Anwendungsszenario „Kostengünstig von Tür-zu-Tür“ (Betriebsphase)

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, unterscheiden sich Intelligente Technische Systeme durch das interne Zielsystem von anderen technischen Systemen. Das Zielsystem umfasst externe, interne und inhärente Ziele [ADG+09, S. 20f.]. Auf Basis der Anwendungsszenarien lassen sich die externen Ziele des Systems ermittelt. Im Validierungsbeispiel wurden die Nutzenpotentiale „Steigerung des Komfort“, „Flexibler Fahrpreis“ und „Flexible Reisezeit“ identifiziert. Die Anwendungsszenarien haben gezeigt, dass die Reisenden die Anforderungen an diese drei Nutzenpotentiale je nach Betriebssituation variieren. Diese gilt es somit, im Zielsystem des RailCab zu berücksichtigen. Ziele lassen sich hierarchisch als Baum darstellen [Fra06, S. 110]. Bild 5-7 zeigt einen Ausschnitt aus dem externen Zielsystem für das RailCab. Auf Basis der externen Ziele können situationsabhängige Kosten- und Nutzenelemente identifiziert werden.

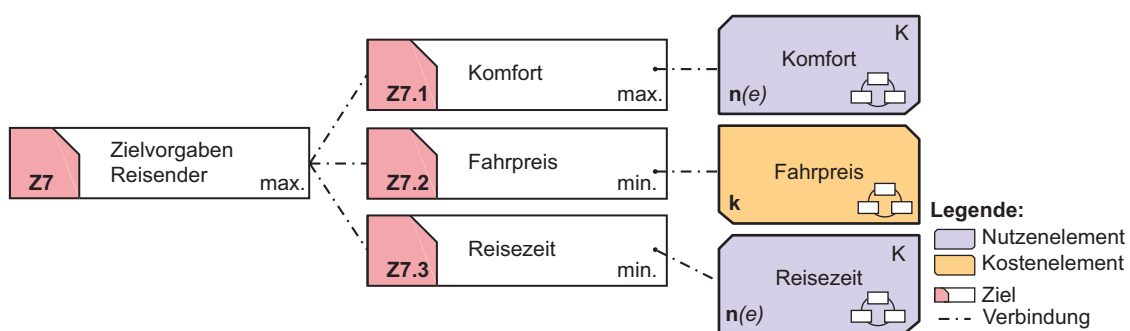


Bild 5-7: Externes Zielsystem des RailCabs und resultierende situationsabhängige Kosten- und Nutzenelemente (Ausschnitt)

### 5.1.6 Identifikation von funktionsabhängigen Nutzelementen

Die Identifikation von funktionsabhängigen Nutzelementen schließt die erste Phase der Systematik ab. Sie erfolgt auf Basis der Anforderungsliste. Die Anforderungsliste dokumentiert die Anforderungen an das zu entwickelnde System und spezifiziert dieses [FGN+13, S. 320]. Es handelt sich um ein gelebtes Dokument, welches im Laufe der Entwicklung kontinuierlich konkretisiert und erweitert wird [Ehr09, S. 375], [FGN+13, S. 321]. In den vorangegangenen Phasen des Konzipierungsprozesses konnten bereits die im Rahmen der strategischen Produktplanung ermittelten Kundenanforderungen sowie die identifizierten Nutzenpotentiale konkretisiert und auf die technische Lösung übertragen werden. Die so identifizierten Anforderungen werden in der Anforderungsliste dokumentiert. Tabelle 5-2 zeigt einen Auszug der Anforderungsliste des RailCabs.



Tabelle 5-2: Anforderungsliste des RailCabs und funktionsabhängige Nutzelemente (Ausschnitt)

Anforderungsliste RailCab (Ausschnitt)						
Stand: 25. Juli 2014						
Nr.	F/ W	Anforderungen	V	FA/Q/R	Quelle	
1	Geometrie					
1.1	F	Shuttlehöhe 3,25 m	<div>Geometrie</div> <div>n(e)</div> <div>K</div> <div><input type="checkbox"/></div>	M.V.	R	NP 25
1.2	F	Shuttlebreite 2,60 m		M.V.	R	NP 25
1.3	F	Shuttlelänge 8,50 m		M.V.	R	NP 25
12	Betrieb					
12.1	Fahrkomfort					
12.1.1	F	Autonom fahrendes Shuttle	<div>Fahrkomfort</div> <div>n(e)</div> <div>K</div> <div><input type="checkbox"/></div>	M.V.	Q	EA
12.1.2	F	Analyse der Ist-Situation		M.V.	FA	AS 10
12.1.3	F	Situationsabhängige Anpassung von Systemzielen		M.V.	FA	AS 10
12.2	Flexibilität					
12.2.1	F	Flexible Reisedauer	<div>Flexibilität</div> <div>n(e)</div> <div>K</div> <div><input type="checkbox"/></div>	M.V.	Q	NP 11
12.2.2	F	Flexible Reisegruppengröße ermöglichen		M.V.	Q	NP 12
12.2.3	F	Flexible Reiseroute ermöglichen		M.V.	Q	NP 13
12.2.4	F	Flexible Reisezeit ermöglichen		M.V.	Q	NP 14
12.2.5	F	Flexibles Fahrpreissystem ermöglichen		M.V.	Q	NP 10
12.3	Benutzungskomfort					
12.3.1	F	Tiefe Trittstufe für Einstieg von der Straße	<div>Benutzungskomfort</div> <div>n(e)</div> <div>K</div> <div><input type="checkbox"/></div>	M.V.	Q	NP 22
12.3.2	F	Wartezeiten beim Wechsel von Verkehrsmitteln gering halten		M.V.	Q	NP 37
12.3.3	F	Schnelle Ein- und Aussteigevorgänge ermöglichen (Rush-Hour)		M.V.	Q	NP 28
16	Kosten					
16.1	F	Herstellkosten RailCab max. 360.000 €	M.V.	RB	EA	
16.2	F	Kosten pro Sitzplatz ca. 36.000 € (Vergleich ICE 50.000 € pro Sitzplatz)	M.V.	RB	EA	
16.3	F	Instandhaltungs- und Wartungskosten pro Jahr max. 1.300 €	M.V.	RB	EA	
16.4	F	Energiekosten max. 4.000 € pro Jahr und RailCab	M.V.	RB	EA	
16.5	W	Geringe Personalkosten für den Systembetrieb	M.V.	RB	EA	
16.6	W	Betriebskosten möglichst gering halten	M.V.	RB	EA	
16.7	W	Fahrpreis minimieren	M.V.	RB	EA	
17	Termin					
17.1	F	Abschluss der Konzeptphase 30. Oktober 2014	M.V.	RB	EA	
17.2	F	Inbetriebnahme 1. September 2025	N.N.	RB	EA	

F/W Forderung/Wunsch  
V Verantwortlich

NP/AS/EA Nutzenpotential/Anwendungsszenario/Entwicklungsaufgabe  
FA/Q/R Funktionale Anforderung/Qualitätsanforderung/Rahmenbedingung



Für eine qualitativ hochwertige Beschreibung<sup>85</sup> der Anforderungen sind die Qualitätskriterien *Korrektheit*, *Eindeutigkeit* und *Umsetzbarkeit* zu berücksichtigen [FGN+13, S. 383]. Zur Vervollständigung der Anforderungsliste haben sich verschiedene Methoden, wie das *Arbeiten nach einer Leitlinie mit einer Hauptmerkmalsliste* nach PAHL/BEITZ oder Checklisten, in der Praxis bewährt [FGN+13, S. 329ff.], [Ehr09, S. 382].

In Anlehnung an POHL wird zwischen funktionalen Anforderungen<sup>86</sup>, Qualitätsanforderungen<sup>87</sup> und Rahmenbedingungen<sup>88</sup> unterschieden [Poh07, S. 14ff.]. Eine weitere Unterscheidung erfolgt zwischen *Forderungen* und *Wünschen* [Ehr09, S. 379]. Zur besseren Nachvollziehbarkeit, wird die Quelle vermerkt aus der die Anforderung stammt.

Die identifizierten Anforderungen werden durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam zu thematischen Kategorien zusammengefasst. Jede Kategorie beschreibt in Anlehnung an KANO ET AL. die Attribute des Systems (vgl. Abschnitt 3.2.3). Die Kategorien werden entsprechend der Attribute benannt, welche sie spezifizieren. Im Validierungsbeispiel wurden u.a. die Attribute *Geometrie*, *Betrieb*, *Fahrtdkomfort* und *Benutzungskomfort* identifiziert. Es handelt sich um die funktionsabhängigen Nutzenelemente des Wirtschaftlichkeitsmodells (vgl. Abschnitt 4.1.3). Darüber hinaus enthält die Anforderungsliste auch die Anforderungen an die Kosten sowie Termine.

## 5.2 Entwicklung des Wirtschaftlichkeitsmodells

In dieser Phase wird auf Basis der zuvor identifizierten Kosten- und Nutzenelemente (vgl. Abschnitt 5.1) das initiale Wirtschaftlichkeitsmodell entwickelt. Durch das Modell legt das interdisziplinäre Entwicklungsteam fest, welche Kosten und welcher Nutzen bei der Entscheidungsfindung während der Entwicklung des Intelligenen Technischen Systems berücksichtigt werden sollen. Hierbei gilt es zu beachten, dass der Aufwand im Allgemeinen mit der Anzahl der betrachteten Kriterien steigt. Es sind somit diejenigen Faktoren zu berücksichtigen, welche tatsächlich für den Betrachtungsgegenstand relevant sind [VDI2884, S. 11]. Zur Modellierung werden die in Abschnitt 4.1.1 definierten Modellkonstrukte eingesetzt. Bei der Modellierung sind die Richtlinien und Bedingungen aus Abschnitt 4.1.4 einzuhalten, um die Vergleichbarkeit, Vollständigkeit sowie Richtigkeit

---

<sup>85</sup> Für weitere Handlungsempfehlungen bei der Beschreibung von Anforderungen wird auf FELDHUSEN ET AL. verwiesen [FGN+13, S. 337ff.].

<sup>86</sup> Funktionale Anforderungen spezifizieren eine Funktionalität, welche das System seinen Stakeholdern bereitstellt [Poh07, S. 15].

<sup>87</sup> Qualitative Eigenschaften des Gesamtsystems, seiner Subsysteme oder Komponenten werden durch Qualitätsanforderungen definiert [Poh07, S. 16].

<sup>88</sup> Rahmenbedingungen schränken die Entwickler im Lösungsraum ein [Poh07, S. 22].

des Wirtschaftlichkeitsmodells sicherzustellen. Es ist zu beachten, dass es sich beim Wirtschaftlichkeitsmodell um ein lebendes Dokument handelt, welches kontinuierlich im Rahmen der Konzipierung konkretisiert wird. Die Entwicklung des initialen Wirtschaftlichkeitsmodells erfolgt in fünf Schritten<sup>89</sup>: Aufbau des Wirtschaftlichkeitsmodells (Abschnitt 5.2.1), Ermittlung der Gewichtungsfaktoren (Abschnitt 5.2.2), Kano-Kategorisierung der Nutzelemente (Abschnitt 5.2.3), Integration von Multiplikatoren (Abschnitt 5.2.4) und Bewertung des erwarteten Nutzens (Abschnitt 5.2.5). Ergebnis ist das initiales Wirtschaftlichkeitsmodell.

### 5.2.1 Aufbau des Wirtschaftlichkeitsmodells

Ausgangspunkt für diese Phase bildet die Grundstruktur der Kosten (vgl. Abschnitt 4.1.2) und des Nutzens im Lebenszyklus (vgl. Abschnitt 4.1.3) sowie die im Rahmen der Phase *Planen und Klären der Aufgabe* des Konzipierungsprozesses identifizierten Kosten- und Nutzelemente (vgl. Abschnitt 5.1). Im ersten Schritt wird die Grundstruktur auf die Entwicklungsaufgabe übertragen; die Zuordnung der identifizierten Kosten- und Nutzelemente erfolgt in Schritt zwei. Abschließend werden die Elemente klassifiziert.

Im ersten Schritt werden die Kosten- und Nutzelemente der Grundstruktur den in Abschnitt 5.1.2 ausgewählten Stakeholdern zugeordnet. Es gilt zu beachten, dass die Grundstruktur lediglich einen Rahmen bildet, der durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam auszugestalten ist. Die Benennung der logischen Beziehungen erfolgt gemäß Abschnitt 4.1.4.2.

Im Validierungsbeispiel wurden dem Hersteller des Systems der *Neue Bahntechnik Paderborn AG* die *Selbstkosten* sowie die darunter aggregierten Elemente zugeordnet; als Nutzelement wurde auf oberster Ebene der *Unternehmensnutzen* zugewiesen (vgl. Anhang A5, Bild A-9).

Den Reisenden wurden als Endkunden die unter *Kundennutzen* aggregierten Nutzelemente zugewiesen sowie als Kosten die *Fahrtkosten* (vgl. Anhang A5, Bild A-12). Eine Unterscheidung zwischen Unternehmen und Kunden, auf der die Grundstruktur aufbaut, ist nicht immer trennscharf, wie der Stakeholder *RailCab AG* in Bild 5-8 zeigt. Die betrachtete Wertschöpfungskette enthält drei Stakeholder. Wie beschrieben konnten der *Hersteller* und die *Reisenden* eindeutig zugeordnet werden. Die Betreibergesellschaft *RailCab AG* ist hingegen sowohl der Kunde, welcher das System RailCab kauft; als auch das Unternehmen, welches die Mobilitätslösung für die Reisenden anbietet.

---

<sup>89</sup> Die Entwicklung und Bewertung des Wirtschaftlichkeitsmodells wird durch ein Excel-Tool unterstützt, dieses wurde im Rahmen der Arbeit prototypisch ohne graphische Repräsentation des Wirtschaftlichkeitsmodells umgesetzt.

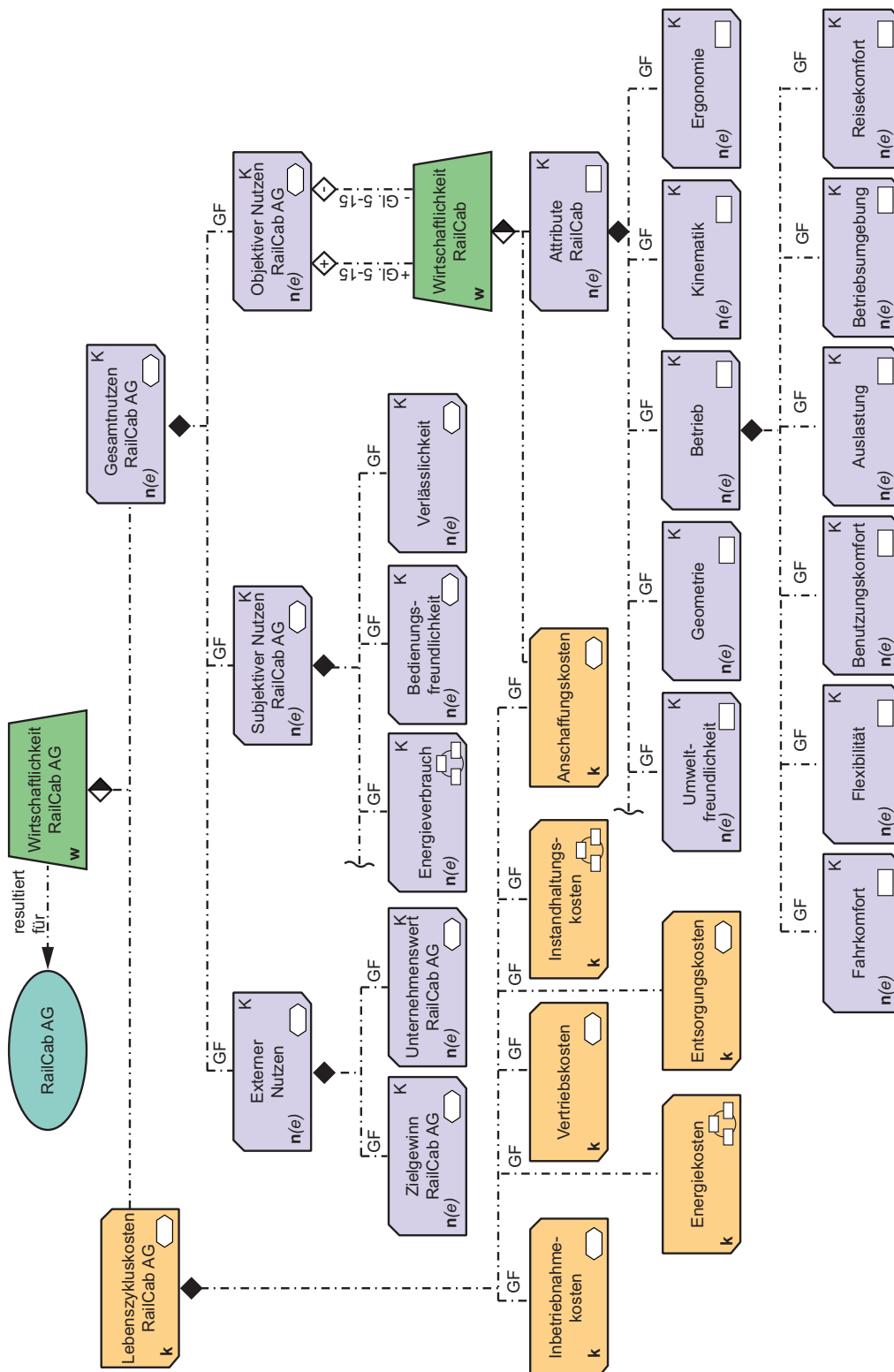


Bild 5-8: Zuordnung der Kosten- und Nutzelemente zum Stakeholder RailCab AG

Aus diesem Grund werden dem Stakeholder sowohl *Kundennutzen* als auch *Unternehmensnutzen* zugewiesen. Zudem werden ihm die *Lebenszykluskosten* und die darunter aggregierten Kosten aus der Grundstruktur plus *Vertriebskosten* zugeordnet.

Der Grundstruktur ordnet das interdisziplinäre Entwicklungsteam im nächsten Schritt die in Abschnitt 5.1 identifizierten Kosten- und Nutzelemente zu. Beispielsweise werden die funktionsabhängigen Nutzelemente aus Abschnitt 5.1.6 unter dem Nutzelement *Attribute* aggregiert (vgl. Bild 5-8). Hierbei sind die Richtlinien und Bedingungen zur Vollständigkeit (vgl. Abschnitt 4.1.4.2) und Richtigkeit (vgl. Abschnitt 4.1.4.3) einzuhalten.

Gemäß der Richtlinien und Bedingungen zur Modellierung (vgl. Abschnitt 4.1.4.1) werden die zugewiesenen Kosten- und Nutzelemente klassifiziert. Im Validierungsbeispiel wurden den, unter dem Nutzelement *Attribute* aggregierten Elemente, der Typ «*funktionsabhängig*» zugewiesen. Die *Betriebskosten* für die RailCab AG sind «*situationsabhängig*» sowie der *Unternehmenswert RailCab AG* «*gesamtsystemabhängig*».

Bild 5-8 zeigt einen Auszug aus dem resultierenden initialen Wirtschaftlichkeitsmodell für den Stakeholder RailCab AG. Verwendete Abkürzungen werden, wie in Abschnitt 4.1.4.2 gefordert, in einem Glossar festgehalten (vgl. Anhang A5).

Abschließend legt das interdisziplinäre Entwicklungsteam den **Bewertungsmaßstab** für das Wirtschaftlichkeitsmodell des Intelligenten Technischen Systems fest. Im Validierungsbeispiel wurde eine Bewertungsskala von 0 (keine Kosten- bzw. Nutzenimplikation) bis 5 (extreme Kosten- bzw. Nutzenimplikation) definiert. Tabelle 5-3 zeigt den Bewertungsmaßstab für das Wirtschaftlichkeitsmodell des RailCabs. Der definierte Bewertungsmaßstab wird innerhalb des gesamten Konzipierungsprozesses einheitlich verwendet.

Tabelle 5-3: *Bewertungsmaßstab für die Kosten- und Nutzelemente im Wirtschaftlichkeitsmodell des RailCabs*

Wirtschaftlichkeit			Bewertungsmaßstab					
			0	1	2	3	4	5
Bewertungs-kriterien	1	Kosten	keine Kosten-implikation	niedrige Kosten-implikation	mittlere Kosten-implikation	mittelstarke Kosten-implikation	sehr starke Kosten-implikation	extreme Kosten-implikation
	2	Nutzen	keine Nutzen-implikation	niedrige Nutzen-implikation	mittlere Nutzen-implikation	mittelstarke Nutzen-implikation	sehr starke Nutzen-implikation	extreme Nutzen-implikation

### 5.2.2 Ermittlung der Gewichtungsfaktoren für Nutzelemente

Die Gewichtung der funktions- und gesamtsystemabhängigen **Nutzelemente** ergibt sich aus den im Rahmen der Strategischen Produktplanung durchgeführten Kundenbefragungen (vgl. Abschnitt 5.1.1). Die Gewichtung der situationsabhängigen Nutzelemente ist wie ihr Nutzwert ebenfalls von der Situation abhängig und wird in Abschnitt 5.5 be-

wertet. Die Gewichtungsfaktoren für die Kostenelemente resultieren auf den obersten Aggregationsebenen aus den Zielkostenvorgaben im Entwicklungsauftrag (vgl. Abschnitt 5.1.1).

Das Vorgehen bei der Gewichtung der funktions- und gesamtsystemabhängigen Nutzelemente ist abhängig von der Anzahl der unter einem Element aggregierten Elemente. Handelt es sich hierbei um mehr als drei Elemente, ist eine einfache Gewichtung durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam nicht handhabbar. Aus diesem Grund erfolgt die Gewichtung zur besseren Handhabbarkeit mit Hilfe einer Gewichtungsmatrix<sup>90</sup> mittels eines paarweisen Vergleichs. Bild 5-9 zeigt die Gewichtungsmatrix zur Ermittlung des Gewichtungsfaktors für die funktionsabhängigen Nutzelemente der Betreibergesellschaft *RailCab AG*.

<b>Gewichtungsmatrix</b>												
<b>Fragestellung:</b> Ist die Erfüllung des Nutzelements i (Zeile) für die Betreibergesellschaft RailCab AG wichtiger als die Erfüllung des Nutzelements j (Spalte)?  <b>Bewertungsmaßstab:</b> 0 = i ist unwichtiger als j 1 = i ist wichtiger als j												
Nutzelement		Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8		25
Geometrie		1		0	0	0	0	0	0	1		1
Kinematik		2	1		1	1	1	0	1	1		8
Kräfte		3	1	0		0	0	0	0	1		4
Energie	Antrieb	4	1	0	1		1	1	1	1		22
	Energiespeicher	5	1	0	1	0		0	1	1		19
	Energieverbrauch	6	1	1	1	0	1		1	1		22
	Bordnetz	7	1	0	1	0	0	0		0		2
Materialien		8	0	0	0	0	0	0	1			1
Umweltfreundlichkeit		25	0	0	0	0	0	0	1	1		10
Summe ( $\Sigma g_i$ und $\Sigma GF_i$ )												300
												100

Bild 5-9: Gewichtungsmatrix zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren  $GF_i$  am Beispiel der funktionsabhängigen Nutzelemente für die RailCab AG (Auszug)

Für jeden Stakeholder erfolgt ein paarweiser Vergleich der ihm zugeordneten Nutzelemente auf der untersten Hierarchieebene unter der Fragestellung: Ist die Erfüllung des Nutzelements i (Zeile) für den Stakeholder wichtiger als die Erfüllung des Nutzelements j (Spalte)? Ist das Nutzelement i wichtiger als das Nutzelement j, wird mit

<sup>90</sup> Nach PAHL/BEITZ können Rangfolgeverfahren und Präferenzmatrizen, welche auf einem paarweisen Vergleich beruhen, zur Gewichtung von Kriterien eingesetzt werden [PBF+13, S. 395].

einer *eins* bewertet; ansonsten wird mit *null* bewertet. Ergebnis der Gewichtungsanalyse ist die Gewichtungssumme je Nutzelement  $g_i$  sowie die Gesamtsumme der Gewichtungssummen  $\sum g_i$ . Der Gewichtungsfaktor  $GF_i$  je Nutzelement  $i$  ergibt sich aus dem Quotienten von Gewichtungssumme  $g_i$  und Gewichtungsfaktor  $\sum g_i$ .

Die ermittelten Gewichtungsfaktoren  $GF_i$  werden entsprechend der Gewichtungsmatrix in das Wirtschaftlichkeitsmodell übertragen (vgl. Bild 5-10). Eine Ausnahme bilden Nutzelemente wie *Antrieb* oder *Energiespeicher*, welche über eine weitere Hierarchieebene in diesem Fall *Energie* aggregiert werden. Für die formal richtige Modellierung ist in diesem Fall wie in Bild 5-10 gezeigt zu verfahren.

Der Gewichtungsfaktor  $GF_{Energie}$  für das Nutzelement *Energie* ergibt sich aus der Summe der Gewichtungsfaktoren der aggregierten Nutzelemente. Im nächsten Schritt greift die folgende Bedingung, dass die Summe der Gewichtungsfaktoren auf einer Hierarchieebene immer 100 Prozent ergeben (vgl. Abschnitt 4.1.4.3).

Dies bedeutet, dass eine Anpassung der Gewichtungsfaktoren auf der untersten Hierarchieebene, wie in Bild 5-10 für das Nutzelement *Antrieb* gezeigt, durchzuführen ist. Der Gewichtungsfaktor  $GF_{Antrieb}$  ergibt sich aus dem Quotienten des ursprünglichen Gewichtungsfaktors  $GF_4$  und dem Gewichtungsfaktor für die Energie  $GF_{Energie}$  multipliziert mit 100. Das Nutzelement *Antrieb* wird somit mit  $GF_{Antrieb} = 33,8\%$  gewichtet.

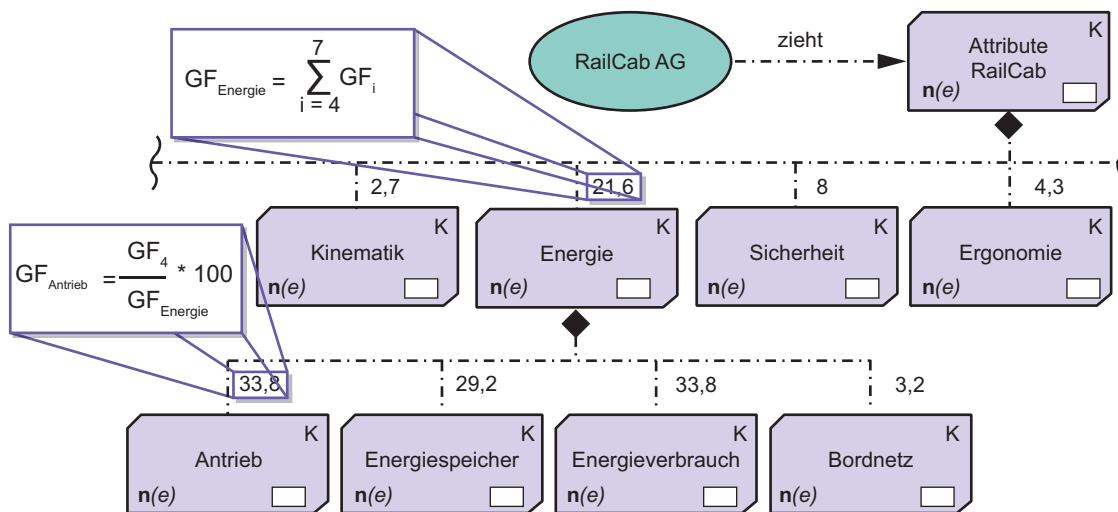


Bild 5-10: Ausschnitt aus dem gewichteten Wirtschaftlichkeitsmodell

### 5.2.3 Kano-Kategorisierung der Nutzelemente

In Anlehnung an KANO ET AL. werden die Nutzelemente in diesem Schritt einer Kano-Kategorie zugewiesen, um ihren unterschiedlichen Beiträgen zur Kundenzufriedenheit gerecht zu werden (vgl. Abschnitt 3.2.3). In der Literatur werden verschiedene Ansätze<sup>91</sup> zur Klassifikation vorgeschlagen, welche aufwendige Kundenbefragungen umfassen. Zur besseren Handhabbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit ein pragmatischer Ansatz in Anlehnung an OLIVER<sup>92</sup> gewählt. Die Kano-Kategorisierung der Nutzelemente erfolgt für jeden betrachteten Stakeholder anhand der in Tabelle 5-4 dargestellten Bewertungskriterien. Die Bewertungsskala für beide Kriterien reicht von null bis fünf.

Das Bewertungskriterium *Leistung des bestehenden Systems* wird mit *null* bewertet, wenn das bestehende System das Nutzelement nicht erfüllt. Erfüllt das System das Nutzelement vollumfänglich, wird mit *fünf* bewertet. Der Bewertungsmaßstab für die *Erwartung des Stakeholders* reicht in Anlehnung an die Erwartungslevels nach OLIVER von *null* (Attribut wird nicht erwartet/eine Erfüllung wäre ideal) bis fünf (Attribut wird erwartet/eine Nichterfüllung wäre nicht tolerierbar) [Oli10, S. 68].

Die Nutzelemente werden gemäß ihrer Bewertung im Kano-Kategorisierungsportfolio dargestellt (vgl. Bild 5-11). Auf der Ordinate wird die Leistung des bestehenden Systems für das Nutzelement abgetragen. Die Abszisse des Portfolios bildet die Erwartung des Stakeholders ab. Das Nutzelement wird durch die Kugel repräsentiert; ihre Farbe gibt Aufschluss über den zugehörigen Stakeholder.

Tabelle 5-4: Bewertungsmaßstab für Kano-Kategorisierung der Nutzelemente

Kano-Kategorie			Bewertungsmaßstab					
			0	1	2	3	4	5
Bewertungs-kriterien	1	Leistung des bestehenden Systems	bestehen-des System erfüllt Nut-zenelement nicht	bestehen-des System erfüllt Nut-zenelement in Ansätzen	bestehen-des System erfüllt Nut-zenelement teilweise	bestehen-des System erfüllt Nut-zenelement zum großen Teil	bestehen-des System erfüllt Nut-zenelement	bestehen-des System erfüllt Nut-zenelement vollumfänglich
	2	Erwartung des Stakeholders	Attribut wird nicht erwartet/eine Erfüllung wäre ideal	Attribut wird nicht erwartet/eine Erfüllung wäre exzellent	Attribut wird nicht erwartet/eine Erfüllung wäre wünschenswert	Attribut wird erwartet/eine adäquate Erfüllung ist notwendig	Attribut wird erwartet/eine Erfüllung wird gefordert	Attribut wird erwartet/eine Nicht-erfüllung ist nicht tolerierbar

<sup>91</sup> Vgl. [MSS09, S. 324ff.].

<sup>92</sup> OLIVER nutzt zur Kategorisierung von Attributen hinsichtlich ihrer Priorität das „*Dichotomous Priority-Based Grid*“, welches die bewertete Leistung des Systems hinsichtlich eines Attributs dessen Bedeutung gegenüberstellt [Oli10, S. 32].

Bei Nutzelementen, die bereits durch das bestehende System bzw. vergleichbare Systeme erfüllt und die vom Stakeholder erwartet werden, können der Kategorie Basisattribute zugewiesen werden. Beispiele sind die *Sicherheit* oder die *Ergonomie* des RailCabs.

Als Leistungsattribute werden Nutzelemente kategorisiert, bei denen das Verhältnis von bestehender Leistung und der Erwartung ausgeglichen ist, wie bei den Nutzelementen *Geringe Wartezeiten* oder der *Fahrkomfort*. Nutzelemente, die vom bestehenden System nicht realisiert und vom Stakeholder nicht erwartet werden, können zur Begeisterung des Stakeholders für das System beitragen. Zu den Begeisterungsattributen zählen für das RailCab bspw. die *Flexibilität* oder die *Individualität*. Das Portfolio zeigt, dass gleiche Nutzelemente von den Stakeholdern unterschiedlich bewertet werden, wie bspw. der Nutzen, welcher aus der *Sicherheit* oder dem *Fahrkomfort* des Systems resultiert. Die ermittelten Kategorien werden den Nutzelementen als Eigenschaft im Wirtschaftlichkeitsmodell zugewiesen (vgl. Bild 5-12).

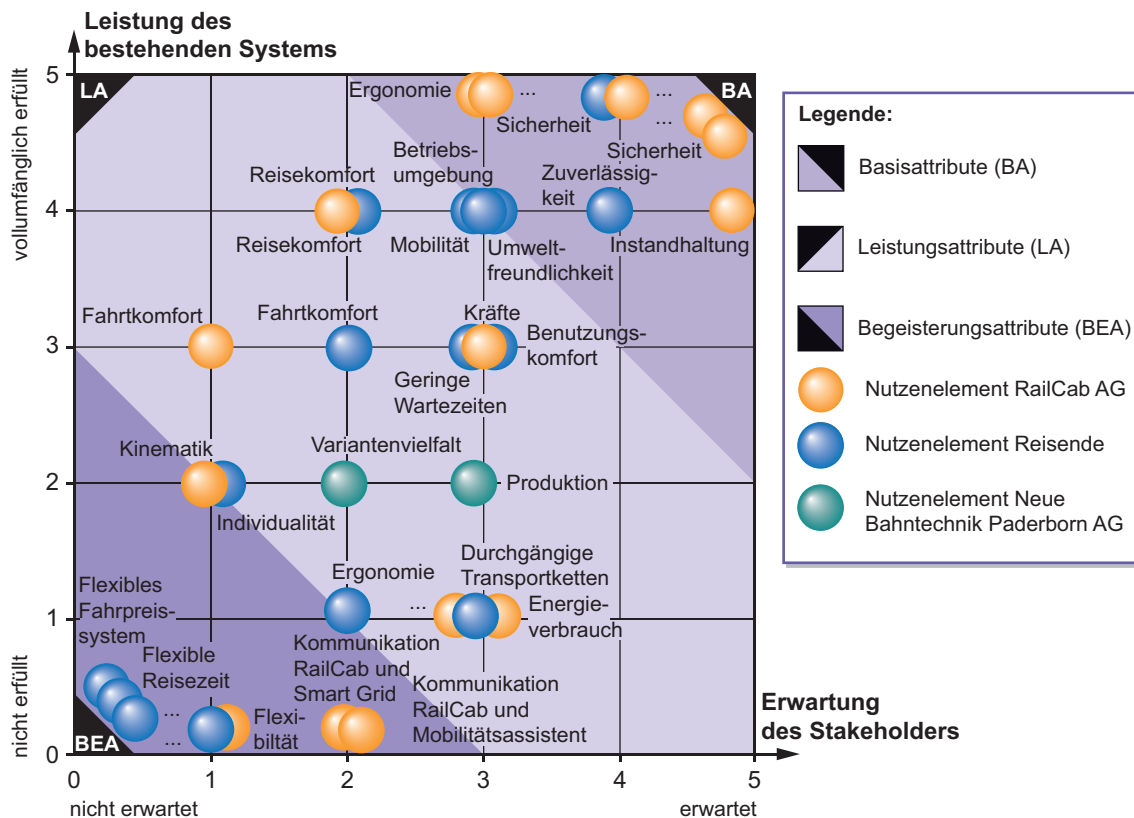


Bild 5-11: Kano-Kategorisierungsportfolio



### 5.2.4 Integration von Multiplikatoren

Wie bereits in den Abschnitten 2.5.3 und 3.2.4 dargestellt, lassen sich die Kosten- und Nutzelemente der Stakeholder nicht unabhängig voneinander betrachten, sie beeinflussen sich vielmehr mittels sogenannter Multiplikatoren. Diese werden in diesem Schritt durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam festgelegt. Die zu berücksichtigenden Multiplikatoren können sich je nach betrachtetem System unterscheiden. Für die Integration der Multiplikatoren und die Definition der Abhängigkeiten ist das Wissen der beteiligten Experten aus dem Bereich Vertrieb und Rechnungswesen notwendig. Gemäß Abschnitt 4.1.4.2 sind die Multiplikatoren nach dem Sachverhalt zu benennen, den sie repräsentieren. Ihnen ist zudem ein Wert als Eigenschaft zuzuweisen sowie ihre Abhängigkeit mit anderen Elementen des Wirtschaftlichkeitsmodells mittels geeigneter Beziehungen abzubilden. Bild 5-12 zeigt die für das Validierungsbeispiel identifizierten Multiplikatoren *Kundenzufriedenheit*, *Auslastung* und das *Absatzpotential*. Sie werden im Folgenden spezifiziert.

#### Kundenzufriedenheit und Unternehmenswert

Einen wesentlichen Multiplikator stellt die Zufriedenheit der Stakeholder mit dem Intelligenten Technischen System dar, im Folgenden **Kundenzufriedenheit** genannt. Sie ergibt sich aus einem Vergleichsprozess zwischen dem vom Stakeholder erwarteten und dem erlebtem Nutzen (vgl. Abschnitt 3.2.3) und hat u.a. Einfluss auf den Unternehmenswert (vgl. Abschnitt 3.2.4). Kundenorientierte Unternehmen sollten daher die Kundenzufriedenheit im Wirtschaftlichkeitsmodell berücksichtigen. Im Validierungsbeispiel wird der Multiplikator Kundenzufriedenheit zum einen für die Betreibergesellschaft RailCab AG und zum anderen für die Reisenden berücksichtigt (vgl. Bild 5-12).

Nach KANO ET AL. wird die Kundenzufriedenheit in Abhängigkeit von der Kano-Kategorisierung  $K$  des betrachteten Nutzelements unterschiedlich stark beeinflusst (vgl. Abschnitt 3.2.3, Bild 3-5). Im Folgenden wird erläutert, wie sich der Wert der Kundenzufriedenheit<sup>93</sup> in Anlehnung an BUHL ET AL. berechnen lässt. Die Kundenzufriedenheit setzt sich insgesamt aus den Teilbewertungen der Nutzelemente  $i$  durch den Stakeholder  $S$  zusammen, die sogenannten Zufriedenheitsbeiträge  $z_{i,K,S}$  (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Die Kundenzufriedenheit ist abhängig vom Wert der Erwartungserfüllung  $x_{i,S}$  durch das Intelligente Technische System. Dieser ergibt sich aus der Differenz vom erlebten Nutzen  $n_{i,S}$  und dem erwarteten Nutzen  $e_{i,S}$  (vgl. Gleichung 5-1). Um unabhängig von der gewählten Bewertungsskala für den Nutzen vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, werden die Nutzwerte auf eins normiert.

---

<sup>93</sup> Für eine detaillierte Herleitung der Berechnung sei auf [BKR+07, S. 879ff.] verwiesen.

$$x_{i,S} = n_{i,S} - e_{i,S}$$

*Gleichung 5-1: Wert der Erwartungserfüllung  $x_{i,S}$  in Anlehnung an [BKR+07, S. 885]*

Die Berechnung des Zufriedenheitsbeitrags  $z_{i,K,S}$  erfolgt als Funktion von  $x_{i,S}$  in Abhängigkeit von der zugehörigen Kano-Kategorie  $K$  für Basis-, Leistungs- und Begeisterungsattribute unterschiedlich. Für **Leistungsattribute** (LA) wird von einem proportionalen Zusammenhang zwischen der Erwartungserfüllung  $x_{i,S}$  und dem Zufriedenheitsbeitrag  $z_{i,K,S}$  ausgegangen. Wird ein Leistungsattribut nicht erfüllt muss der Zufriedenheitsbeitrag  $z_{i,K,S}$  stets mindestens so groß sein wie bei einem Basisattribut. Bei Übererfüllung darf dieser hingegen niemals so groß werden, wie für ein Begeisterungsattribut [BKR+07, S. 886]. Aus diesem Grund wird der Wertebereich für den Zufriedenheitsbeitrag für ein Leistungsattribut auf ein Intervall zwischen  $[\bar{a}, \underline{a}]$  mit  $|\underline{a}| > |\bar{a}|$  und  $\underline{a} \in (-1, 0)$  bzw.  $\bar{a} \in (0, 1)$  begrenzt [BKR+07, S. 887].

Die Auswahl der Grenzen erfolgt durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam auf Basis der Erfahrungen mit den Vorgängersystemen. Im Rahmen des Validierungsbeispiels wurde für die untere Grenze  $\underline{a} = -0,8$  und für die obere Grenze  $\bar{a} = 0,6$  gewählt. Der Zufriedenheitsbeitrag für Leistungsattribute berechnet sich wie in Gleichung 5-2 dargestellt.

$$z_{i,LA,S} = -\underline{a}x_{i,S} \text{ für } x_{i,S} \leq 0$$

$$z_{i,LA,S} = \bar{a}x_{i,S} \text{ für } x_{i,S} > 0$$

*Gleichung 5-2: Zufriedenheitsbeitrag  $z_{i,LA,S}$  für Leistungsattribute in Anlehnung an [BKR+07, S. 888]*

**Begeisterungsattribute** (BEA) werden vom Stakeholder nicht explizit nachgefragt. Eine Nichterfüllung wird somit lediglich zur Indifferenz beim Stakeholder führen. Bei Erfüllung des Attributs wird die Kundenzufriedenheit hingegen streng zunehmend wachsen [BKR+07, S. 886]. Da die lineare Funktion für die Leistungsattribute (LA) nicht mit der Parabel für die Begeisterungsattribute (BEA) zusammenfallen darf, ergibt sich folgende Gleichung 5-3. Im Validierungsbeispiel ergibt sich für  $b = 0,4$ .

$$z_{i,BEA,S} = 0 \text{ für } x_{i,S} \leq 0$$

$$z_{i,BEA,S} = \bar{a}x_{i,S} + bx_{i,S}^2 \text{ für } x_{i,S} > 0 \text{ mit } b = 1 - \bar{a}$$

*Gleichung 5-3: Zufriedenheitsbeitrag  $z_{i,BEA,S}$  für Begeisterungsattribute in Anlehnung an [BKR+07, S. 888]*

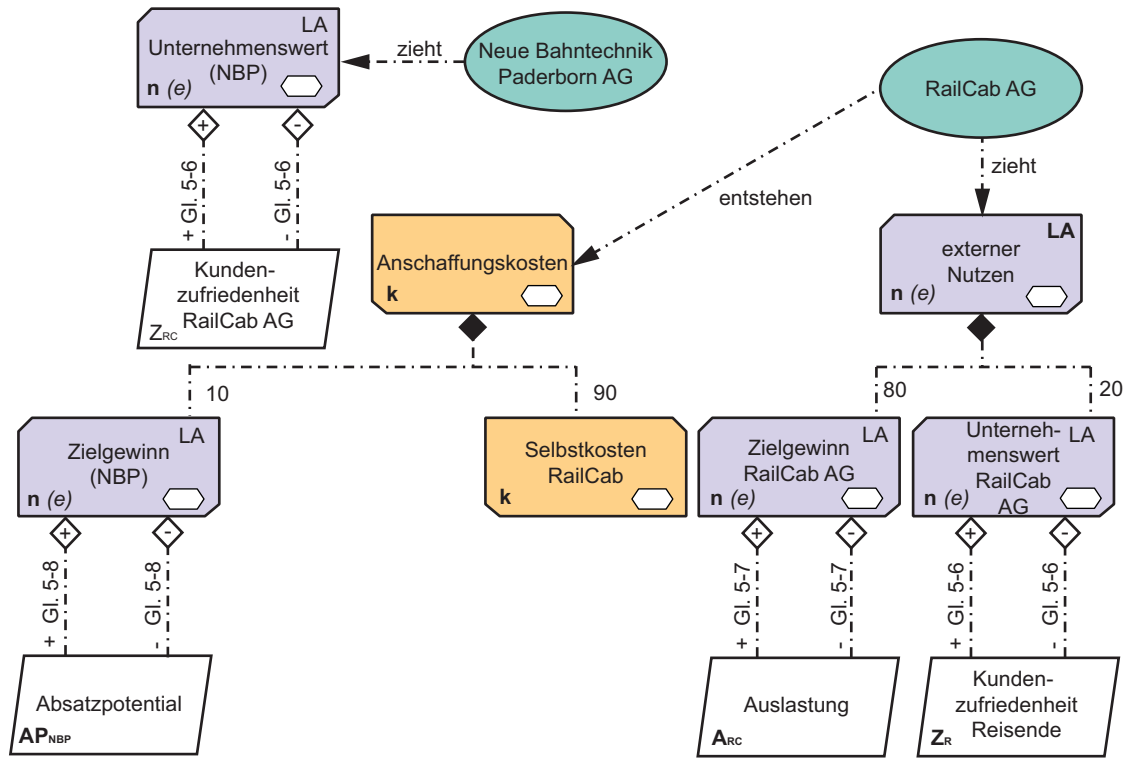


Bild 5-12: Integration von Multiplikatoren in das Wirtschaftlichkeitsmodell des RailCabs

Die Erfüllung der Erwartungen des Stakeholders bei **Basisattributen** (BA) führt zu Indifferenz; eine Übererfüllung der Anforderungen wird die Kundenzufriedenheit nicht steigern. Wird die Erwartung hingegen nicht erfüllt, resultieren bereits geringe Abweichungen in Unzufriedenheit. Aus diesem Grund wird ein Bereich von 0 bis  $-d$  festgelegt in dem der Zufriedenheitsbeitrag  $z_{i,BA,S}$  für leicht negative  $x_{i,S}$  auf den Minimalwert von  $-1$  sinkt [BKR+07, S. 886ff.]. Im Validierungsbeispiel wurde für  $d = 0,3$  gewählt, so dass bei einer Abweichung von einer Bewertungseinheit die Kundenzufriedenheit sinkt. Weicht der erlebte Nutzen  $k_{i,S}$  stärker vom erwarteten Nutzen  $e_{i,S}$  ab, so erreicht der Zufriedenheitsbeitrag  $z_{i,BA,S}$  den Minimalwert. Es ergibt sich die folgende Gleichung 5-4:

$$z_{i,BA,S} = -1 \text{ für } x_{i,S} < -d$$

$$z_{i,BA,S} = -\underline{a}x_{i,S} - cx_{i,S}^2 \text{ für } -d \leq x_{i,S} < 0 \text{ mit } c = \frac{1}{d^2} + \frac{a}{d}$$

$$z_{i,BA,S} = 0 \text{ für } x_{i,S} \geq 0$$

Gleichung 5-4: Zufriedenheitsbeitrag  $z_{i,BA,S}$  für Basisattribute (BA) in Anlehnung an [BKR+07, S. 888]

Die ermittelten Zufriedenheitsbeiträge  $z_{i,K,S}$  werden nachfolgend mit dem zuvor bestimmten Gewichtungsfaktor  $GF_i$  (vgl. Abschnitt 5.2.2) zu einer Gesamtzufriedenheit  $Z_S$  aggregiert<sup>94</sup> (vgl. Gleichung 5-5).

$$Z_{S,K} = \sum_{i=1}^I (z_{i,K,S} * GF_i)$$

$$Z_S = Z_{S,LA} + Z_{S,BEA} + Z_{S,BA}$$

*Gleichung 5-5: Berechnung der Gesamtzufriedenheit  $Z_S$*

Hierbei gleichen sich negative und positive Zufriedenheitsbeiträge  $z_{i,K,S}$  innerhalb einer Kategorie sowie die Zufriedenheitsbeiträge  $Z_{S,K}$  Kategorie übergreifend aus. Im Rahmen der Konzipierung sollte bei negativen Zufriedenheitsbeiträgen  $Z_{S,K}$ , insbesondere für Basisattribute, eine Verbesserung der Prinziplösung und somit der Kundenzufriedenheit erfolgen.

Wie in Abschnitt 3.2.4 hergeleitet und in Bild 5-12 dargestellt, beeinflusst die Kundenzufriedenheit den Unternehmenswert. Nach MATZLER und STAHL wird ein sattelförmiger Zusammenhang angenommen (vgl. Bild 3-7). Dieser Annahme wird im Rahmen der Arbeit zur Berechnung des **Unternehmenswerts** gefolgt.

Für das Nutzelement *Unternehmenswert* entspricht der erwartete Nutzwert  $e_{U,S}$  dem bisherigen Wert des Unternehmens. Ziel durch die Entwicklung und Vermarktung eines neuen Intelligenten Technischen System ist die Erhaltung des Status-quo und im besten Fall eine Verbesserung des Unternehmenswerts. Liegt die Kundenzufriedenheit  $Z_S \in (-1,1)$  innerhalb der Indifferenzzone  $[-f, f]$  mit  $f < 1$  und  $f \in [0, 1)$  verändert sich der Unternehmenswert nicht. Außerhalb der Indifferenzzone steigt bzw. sinkt der Unternehmenswert. Der Wert für  $f$  wird durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam auf Basis ihres Erfahrungswissens festgelegt. Im Validierungsbeispiel wurde  $f = 0,3$  gewählt. Für den erwarteten Nutzwert  $e_{U,S}$  sowie den erlebten Nutzwert  $n_{U,S}$  liegt das Minimum bei *null* das Maximum ist abhängig von der eingesetzten Bewertungsskala. Im Validierungsbeispiel ergibt sich für das Maximum  $e_{U,S,max.} = 5$  und  $n_{U,S,max.} = 5$  (vgl. Tabelle 5-3). Der erlebte Nutzwert  $n_{U,S}$  für das Nutzelement *Unternehmenswert* berechnet sich in Abhängigkeit von der Kundenzufriedenheit  $Z_S$  und vor dem Hintergrund der zuvor genannten Nebenbedingungen wie in Gleichung 5-6 dargestellt.

---

<sup>94</sup> Da es sich im Rahmen des Wirtschaftlichkeitsmodells um eine grobe Abschätzung der Kundenzufriedenheit handelt erfolgt die Berechnung in Anlehnung an [KST+84, S. 39ff.] durch einfache Addition. BUHL ET AL. liefern einen Ansatz zur Berechnung mit Hilfe der Cobb-Douglas Funktion. Dieser kann bei Bedarf ebenfalls eingesetzt werden. Für das Vorgehen sei auf [BKR+07, S. 889ff.] verwiesen.

$$\begin{aligned}
n_{U,S} &= mZ_S^2 + vZ_S + e_{U,S} \text{ für } f < Z_S \text{ mit } v = \frac{n_{U,S,max.}}{2} \text{ und } m = v - e_{U,S} \\
n_{U,S} &= e_{U,S} \text{ für } -f \leq Z_S \leq f \\
n_{U,S} &= -mZ_S^2 + vZ_S + e_{U,S} \text{ für } Z_S < -f \text{ mit } v = \frac{n_{U,S,max.}}{2} \text{ und } m = v - e_{U,S}
\end{aligned}$$

Gleichung 5-6: Berechnung des Unternehmenswerts  $n_{U,S}$

### Auslastung/Absatzpotential und Zielgewinn

Neben dem Unternehmenswert wird auch der Gewinn für ein Unternehmen im Wirtschaftlichkeitsmodell durch Multiplikatoren beeinflusst. Für die Betreibergesellschaft RailCab AG (RC) im Validierungsbeispiel ist der Nutzwert für das Nutzelement *Zielgewinn* abhängig von der **Auslastung** des RailCabs im Betrieb (vgl. Bild 5-12). Für den Hersteller des RailCabs die Neue Bahntechnik Paderborn AG (NBP) beeinflusst der Erschließungsgrad des **Absatzpotentials** den Zielgewinn. Bei einer hohen Auslastung  $A_{RC}$  der RailCabs wird der *Zielgewinn* entsprechend steigen; gleiches gilt für das Absatzpotential  $AP_{NBP}$  und den *Zielgewinn* der NBP AG. Es wird somit ein linearer Zusammenhang zwischen Auslastung  $A_{RC}$ /Absatzpotential  $AP_{NBP}$  und dem Wert für den erlebten Zielgewinn  $n_{G,S}$  angenommen. Dabei gilt  $A_{RC} \in (0,1)$  und  $AP_{NBP} \in (0,1)$ . Der erwartete Wert für den Zielgewinn  $e_{G,S}$  wird durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam festgelegt. Dieser entspricht dem erlebten Zielgewinn  $n_{G,S}$  bei einer 100-prozentigen Auslastung  $A_{RC,G}$  bzw. Erschließung des Absatzpotentials  $AP_{NBP,G}$ . Somit berechnet sich der *Zielgewinn* wie in Gleichung 5-7 und Gleichung 5-8 beschrieben.

$$n_{G,RC} = A_{RC} * e_{G,RC}$$

Gleichung 5-7: Berechnung des erlebten Nutzwerts für den Zielgewinn  $n_{G,RC}$

$$n_{G,NBP} = AP_{NBP} * e_{G,NBP}$$

Gleichung 5-8: Berechnung des erlebten Nutzwerts für den Zielgewinn  $n_{G,NBP}$

Bei beiden Multiplikatoren handelt es sich, anders als bei der Kundenzufriedenheit  $Z_S$ , um eine von den Elementen und ihrer Bewertung im Wirtschaftlichkeitsmodell unabhängige Variablen. Sie werden vielmehr im Rahmen der abschließenden Wirtschaftlichkeitsbewertung (vgl. Abschnitt 5.6.2) variiert und so die Sensibilität des Wirtschaftlichkeitsmodells getestet. Auf diese Weise kann ermittelt werden, bis zu welcher Auslastung bzw. zu welchem Grad der Erschließung des Absatzpotentials das Intelligente Technische System für die Stakeholder noch wirtschaftlich ist.

### 5.2.5 Bewertung des erwarteten Nutzens

Im letzten Schritt der Phase *Entwicklung des Wirtschaftlichkeitsmodells* wird für jedes Nutzelement  $i$  im Wirtschaftlichkeitsmodell der erwartete Nutzen  $e_{i,S}$  bewertet. Hierzu wird der in Abschnitt 5.2.1 festgelegte Bewertungsmaßstab verwendet. Die Bewertungsskala reicht von null bis fünf. Die Bewertung erfolgt durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam auf Basis der ihm vorliegenden Informationen. Sie orientiert sich an den Erwartungen der Stakeholder aus Abschnitt 5.2.3. Nutzelemente aus der Kategorie der Begeisterungsattribute werden vom Kunden nicht explizit nachgefragt; aus diesem Grund ist der erwartete Nutzen geringer als bei Leistungs- und Basisattributen (vgl. [BKR+07, S. 886]). Der erwartete Nutzen für den *Unternehmenswert*  $e_{U,S}$  entspricht dem derzeit durch das Unternehmen realisierten Unternehmenswert; der Zielgewinn  $e_{G,S}$  entspricht dem erwarteten Wert bei maximaler Ausschöpfung der Potentiale, wie in Abschnitt 5.2.4 beschrieben. Bild 5-13 zeigt einen Ausschnitt aus dem im Validierungsbeispiel bewerteten Wirtschaftlichkeitsmodell.

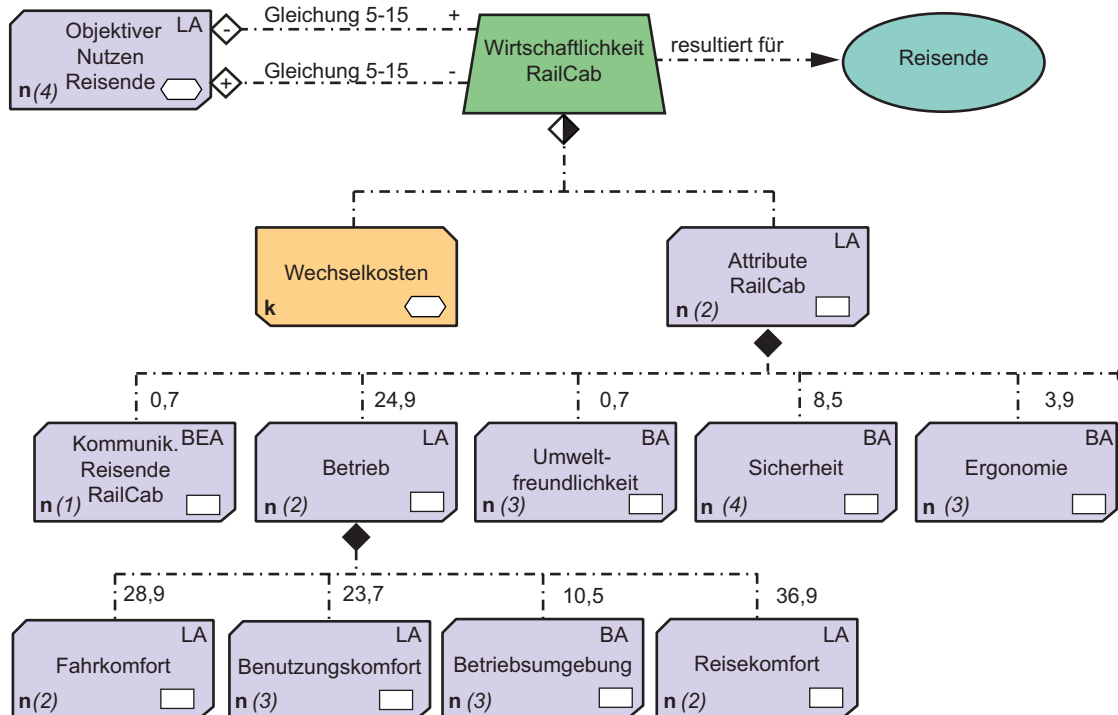


Bild 5-13: Bewertung des erwarteten Nutzens  $e_{i,S}$  im Wirtschaftlichkeitsmodell (Auszug)

Für Nutzelemente auf der obersten Aggregationsebene  $j$  ergibt sich der erwartete Nutzen  $e_{j,S}$  entsprechend aus den gewichteten Teilbewertungen der aggregierten Nutzelemente  $i$  wie in Gleichung 5-9 aufgezeigt. Beispiel hierfür sind die in Bild 5-13 dargestellten Nutzelemente *Betrieb* und *Attribute*.

$$e_{j,s} = \sum_{i=1}^I (e_{i,s} * GF_i)$$

*Gleichung 5-9: Berechnung des erwarteten Nutzens  $e_{j,s}$  für ein Nutzelement auf oberster Aggregationsebene*

Ergebnis der Phase ist das initiale Wirtschaftlichkeitsmodell, welches im Folgenden die Bewertung und Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsvariante im Konzipierungsprozess unterstützt.

### **5.3 Bewertung und Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsvariante**

Entwicklungsprozesse werden durch einen enormen Zeitdruck sowie beschränkte Ressourcen geprägt. Aus diesem Grund können nicht alle entwickelten Lösungsvarianten weiterverfolgt werden. Es ist notwendig, die Anzahl der Lösungsvarianten zu reduzieren [Lin09, S. 179], [Sto10, S. 113]. Nach PAHL und BEITZ hat eine technische Lösung die *Erfüllung der technischen Funktion, ihre wirtschaftliche Realisierung sowie die Einhaltung der Sicherheit für Menschen und die Umgebung* zum Ziel [PBF+07, S. 57]. Die Auswahl einer Lösungsvariante erfolgt im Rahmen der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung in einem mehrstufigen Verfahren. Ausgangspunkt sind im Rahmen des Konzipierungsprozesses entwickelte Lösungsvarianten. Das Vorgehen zur Entwicklung dieser Varianten wird in Abschnitt 5.3.1 für das bessere Verständnis der nachfolgenden Bewertungsschritte kurz dargestellt. Grundvoraussetzung für eine weiterzuverfolgende Lösungsvariante ist die Erfüllung der geforderten technischen Funktion. Im ersten Bewertungsschritt werden die Lösungsvarianten hinsichtlich ihrer Anforderungserfüllung bewertet (vgl. Abschnitt 5.3.2). Nur Lösungen, welche die Anforderungen und somit die geforderte Funktionalität der Stakeholder umfassend erfüllen, werden im Folgenden hinsichtlich ihrer relativen Wirtschaftlichkeit bewertet. Im Sinne des Target Costings (vgl. Abschnitt 3.3.1) ist eine Lösungsvariante wirtschaftlich, wenn das Verhältnis von Kosten und Nutzen ausgeglichen ist. In Abschnitt 5.3.3 wird für jede Teilfunktion ihr Beitrag zum funktionsabhängigen Nutzen ermittelt. Für die Lösungsvarianten werden im nächsten Schritt die Kosten für die Realisierung der Funktion bewertet und der Beitrag der Teilfunktion zu den funktionsabhängigen Kosten ermittelt. Abschließend wird für jede Lösungsvariante eine Zielkostenkontrolle durchgeführt und die wirtschaftlichste Lösungsvariante ausgewählt. Für diese wird die Prinzipiellösung im Rahmen der Konzipierung vervollständigt, wie in Abschnitt 5.3.4 der Vollständigkeit halber kurz dargestellt. Für diese wird abschließend das Wirtschaftlichkeitsmodell für funktions- und gesamtsystemabhängige Nutzelemente bewertet sowie die Kundenzufriedenheit berechnet (vgl. Abschnitt 5.2.5).

### 5.3.1 Lösungsvarianten

Lösungsvarianten für das zu entwickelnde Intelligente Technische System werden im Rahmen der Konzipierung auf Gesamt- und Subsystemebene entwickelt (vgl. Abschnitt 2.5.6). Sie sind Ausgangspunkt für die folgenden Bewertungsschritte in den Abschnitten 5.3.2 und 5.3.3. Für eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens bei der Entwicklung von Lösungsvarianten ist auf GAUSEMEIER und VABHOLZ [GV14b, S. 70ff.] sowie GAUSEMEIER ET AL. [GFD+09, S. 201ff.] verwiesen. Im Folgenden werden kurz die für das weitere Verständnis notwendigen Schritte und ihre Ergebnisse beschrieben. Bild 5-14 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse für das Validierungsbeispiel RailCab in Anlehnung an die Ergebnisse aus dem SFB 614.

Aus den in Abschnitt 5.1.6 identifizierten Anforderungen werden zunächst Funktionen abgeleitet. Sie beschreiben einen gewollten Zusammenhang zwischen In- und Output eines Systems zur Erfüllung einer spezifischen Aufgabe. Die Gesamtfunktion (*autonom fahren*) wird in Hauptfunktionen (*System fortbewegen, etc.*) untergliedert. Im Sinne des Systementwurfs erfolgt die Unterteilung in Subfunktionen (*System tragen, etc.*) solange, bis sich für die Teilfunktionen (*Energie aufnehmen*) sinnvolle Lösungen finden lassen [PBF+07, S.44], [VDI2221, S. 10]. Die gefundenen *Funktionen* werden im gleichnamigen Partialmodell in der Funktionshierarchie dargestellt. Diese wird auch als Kreativitätstechnik eingesetzt, um weitere Funktionen zu identifizieren [GLL12, S. 94f.]. Funktionskataloge (bspw. [Bir80]) sowie die Entwurfsschablone nach DUMITRESCU für die Funktionen der Informationsverarbeitung (*System überwachen, System optimieren, etc.*) unterstützen die Entwickler bei der Erstellung der Funktionshierarchie [Dum11, S. 118]. Funktionen der Informationsverarbeitung werden auch kognitive Funktionen genannt und sind spezifisch für Intelligente Technische Systeme [Dum11, S. 98]. Die Funktionen werden als Substantiv-Verb-Kombination lösungsneutral beschrieben (vgl. Bild 5-14).

Im nächsten Schritt werden für die Teilfunktionen der Funktionshierarchie Lösungsmuster bzw. Lösungselemente identifiziert. Lösungsmuster im Kontext Intelligenter Technischer Systeme sind in Anlehnung an ALEXANDER ET AL. in der Umwelt auftretende Probleme, sowie die Beschreibung ihrer Lösung, so dass diese Lösung in anderen Kontexten erneut eingesetzt werden kann [Dum11, S. 38f.], [AIS+95, S. 12]. Lösungselemente stellen eine konkrete, existierende und bewährte Lösung zur Erfüllung einer Funktion dar. Es handelt sich meist um ein Modul/eine Baugruppe, das/die auf einem Wirkprinzip beruhen [GEK01, S. 36]. *Lösungsmuster für fortgeschrittene mechatronische Systeme* nach DUMITRESCU realisieren kognitive Funktionen. Sie werden einheitlich spezifiziert, so dass eine einfache Integration in die mit CONSENS spezifizierte Prinziplösung möglich ist [Dum11, S. 130ff.]. Durch eine konsistente Kombination dieser Teillösungen im morphologischen Kasten nach ZWICKY werden Lösungsvarianten entwickelt [Zwi89, S. 13ff.]. Die konsistente Kombination der Teillösungen wird durch die Ansätze nach KÖCKERLING [Köc04, S. 82ff.] oder BRINK unterstützt [Bri10, S. 137ff.]. Ergebnis sind konsistente Lösungsvarianten, welche im Folgenden bewertet werden.



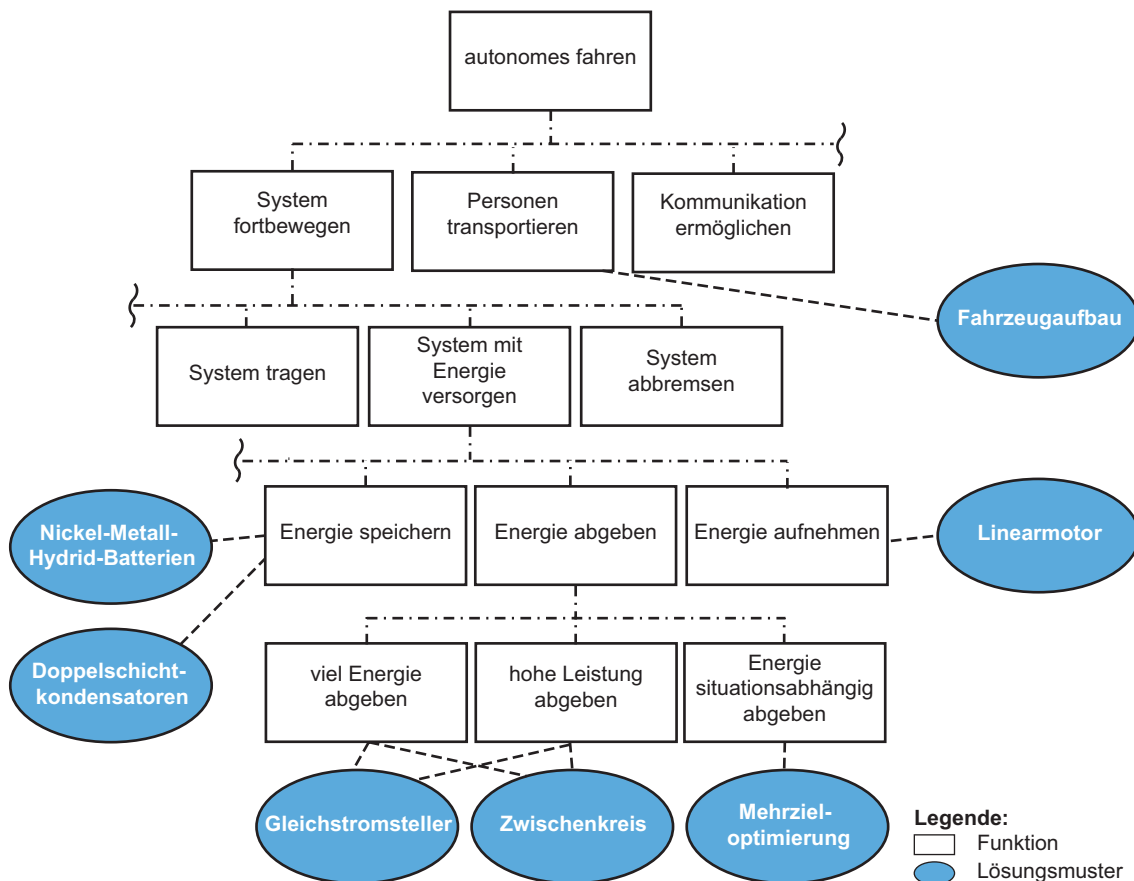


Bild 5-14: Entwicklung von Lösungsvarianten

### 5.3.2 Bewertung der Anforderungserfüllung

Es können lediglich Lösungsvarianten weiter betrachtet werden, welche die an das Intelligente Technische System gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.1.6) erfüllen. Zur Bewertung der Anforderungserfüllung werden die Anforderungen den konsistenten Lösungsvarianten aus Abschnitt 5.3.1 gegenübergestellt. Bild 5-15 zeigt einen Ausschnitt aus der *Anforderungserfüllungsmatrix* für das Validierungsbeispiel.

Für jede Kombination wird bewertet, wie die Lösungsvariante *i* (Spalte) die Anforderung *j* (Zeile) erfüllt. Zur Bewertung wird eine Bewertungsskala von null bis zwei eingesetzt. Wird die Anforderung nicht erfüllt, wird mit *null* bewertet, wird sie teilweise erfüllt mit *eins* und bei voller Erfüllung der Anforderung mit *zwei*. Es werden alle Lösungsvarianten im Folgenden weiterverfolgt, welche die Anforderungen vollumfänglich erfüllen. Im Validierungsbeispiel trifft dies nur auf Lösungsvariante Nr.2 zu. Es können prinzipiell aber auch mehr Varianten ausgewählt werden.

Anforderungserfüllungsmatrix	Anforderung	1. Geometrie				4. Energiespeicher				15. Umweltfreundlichkeit			Summe	Wert der Anforderungserfüllung [%]
		1.1 Shuttlehöhe 3,25 m	1.2 Shuttlebreite 2,60 m	1.3 Shuttlelänge 8,50 m		4.2.1 Energiespeicherung vorsehen	4.2.2 Rückspeisung d. Bremsenergie	4.2.3 Maximale Batterielebensdauer		15.3 Umweltfreundliches System	15.4 Klimaschonender Betrieb	15.5 Geringer Verkehrslärm		
Lösungsvarianten	Nr.	1	2	3		27	28	29		178	178	183		
Lösungsvariante 1	1	2	2	2		2	2	2		2	2	2	354	96
Lösungsvariante 2	2	2	2	2		2	2	2		2	2	2	366	100
Lösungsvariante 3	3	2	2	2		2	2	0		2	2	2	360	98
Lösungsvariante 4	4	2	2	2		2	2	1		1	2	2	320	87

Bild 5-15: Bewertung der Anforderungserfüllung der Lösungsvarianten

### 5.3.3 Durchführung der Zielkostenkontrolle

Für die zuvor ausgewählten Lösungsvarianten wird in diesem Schritt eine Zielkostenkontrolle durchgeführt und somit die relative Wirtschaftlichkeit der Lösungsvarianten bewertet. Hierzu wird in einem Zielkostendiagramm in Anlehnung an TANAKA [Tan89, S. 61 ff.] und BRINK [Bri10, S. 51] für jede Teilfunktion-Lösungselement-Kombination ihr Funktionsnutzenbeitrag je Stakeholder  $FNB_{i,s}$  dem Funktionskostenbeitrag  $FKB_i$  der Teilfunktion  $i$  gegenübergestellt.

#### Ermittlung des Nutzenbeitrags der Teilfunktionen

Die Ermittlung des Nutzenbeitrags der Teilfunktionen erfolgt mit Hilfe der in Bild 5-16 dargestellten Nutzenbeitragsmatrix<sup>95</sup>. In der Nutzenbeitragsmatrix werden die Teilfunktionen den funktionsabhängigen Nutzelementen aus dem Wirtschaftlichkeitsmodell gegenübergestellt und hinsichtlich der Fragestellung bewertet: Trägt die Teilfunktion  $i$  (Zeile) zur Erfüllung des funktionsabhängigen Nutzelements  $j$  (Spalte) bei? Die Bewertungsskala reicht von null bis zwei.

<sup>95</sup> Die Nutzenbeitragsmatrix lehnt sich an die Unterstützungsmatrix nach BRINK an [Bri10, S. 125f.].

Nutzenbeitragsmatrix												
<b>Fragestellung:</b> Trägt die Teilfunktion i (Zeile) zur Erfüllung des funktionsabhängigen Nutzenelements j (Spalte) bei?	<b>Funktionsabhängiges Nutzenelement</b>											
		Geometrie										
		Kinematik										
		Kräfte										
<b>Bewertungsskala:</b> 0 bis 2												
	Antrieb											
	Energiespeicher											
	Energieverbrauch											
<b>Bewertungsmaßstab:</b> 0 = i trägt nicht zu j bei 1 = i trägt zu j bei 2 = i trägt sehr stark zu j bei												
	Zuverlässigkeit											
	Durchgängige Transportketten											
Teilfunktion	Nr.	1	2	3	4	5	6		34	35	Funktionsnutzenbeitrag RailCab AG FNB <sub>i,RC</sub> [%]	Funktionsnutzenbeitrag Reisender FNB <sub>i,R</sub> [%]
Kommunikation mit Smart Grid ermöglichen	1	0	0	0	0	0	2		0	0	1,2	0
Energie verteilen	2	0	0	0	2	2	2		1	0	3,37	1,1
Energie aufnehmen	3	0	0	0	2	2	2		1	0	3,15	0,98
Viel Energie abgeben	4	0	0	0	2	2	2		1	0	3,15	1,3
Hohe Leistung abgeben	5	0	0	0	2	2	2		1	0	3,15	1,3
Energie situationsabhängig abgeben	6	0	0	0	2	2	2		1	0	3,23	1,3
Energie speichern	7	0	0	0	1	2	1		1	0	2,34	1,3
Sicherheit gewährleisten	8	0	0	0	0	2	0		2	0	1,08	0,68
Vertikale Kräfte dämpfen	9	1	1	2	0	0	0		0	0	1,14	0,75
Horizontale Kräfte dämpfen	10	1	1	2	0	0	0		0	0	1,14	0,75
Daten weiterleiten	91	0	0	0	0	0	0		0	0	0,78	0,46
Summe ( $\Sigma u_{i,j}$ )		4	33	16	21	16	16		54	4	100	100
Faktor $f_j$ für Funktionsbeitrag		0,25	0,03	0,06	0,05	0,06	0,06		0,02	0,3		
Gewichtungsfaktor RailCabAG GF <sub>i,RC</sub>		0,7	2,7	1,3	7,3	6,3	7,3		0	0		
Gewichtungsfaktor Reisender GF <sub>i,R</sub>		0	0	0	0	0	0		8,5	3,9		

Bild 5-16: Funktionsnutzenbeitrag der Teilfunktionen je Stakeholder FNB<sub>i,S</sub>

Im Validierungsbeispiel liefert u.a. die Teilfunktion *Energie verteilen* (Zeile 2) keinen Beitrag zum Nutzenelement *Geometrie* (Spalte 1). Besteht ein Nutzenbeitrag, so wird mit einer *Eins* bewertet, wie bei *Vertikale Kräfte dämpfen* (Zeile 9) und *Kinematik* (Spalte 2). Liefert die Teilfunktion einen sehr starken Beitrag zum Nutzenelement, wie die Teilfunktion *Energie situationsabhängig abgeben* (Zeile 6) zum Nutzenelement *Energieverbrauch* (Spalte 6), wird mit einer *Zwei* bewertet.

Der Funktionsnutzenbeitrag FNB<sub>i,S</sub> je Teilfunktion in Abhängigkeit vom Stakeholder S ergibt sich, wie in Gleichung 5-10 dargestellt, aus der Summe der Produkte der Teilbewertung  $u_{i,j}$ , dem Faktor  $f_j$  sowie dem Gewichtungsfaktor GF<sub>j,S</sub>. Der Faktor  $f_j$  repräsentiert die Anzahl der, für die Erfüllung des Nutzenelements  $j$ , notwendigen Teilfunktionen  $i$ . Der Gewichtungsfaktor GF<sub>j,S</sub> resultiert aus dem Wirtschaftlichkeitsmodell (vgl. Abschnitt 5.2.2). Ist ein Nutzenelement für einen Stakeholder nicht relevant, wie bspw. das

Nutzelement „*Kinematik*“ (Spalte 2) für den Reisenden, ist der Gewichtungsfaktor  $GF_{j,S}$  gleich *null*.

$$FNB_{i,S} = \sum_{j=1}^J (u_{i,j} * f_j * GF_{j,S}) \text{ mit } f_j = \frac{1}{\sum_{i=0}^I u_{i,j}}$$

Gleichung 5-10: Berechnung des Funktionsnutzenbeitrags  $FNB_{i,S}$  je Teilfunktion

### Ermittlung des Kostenbeitrags der Teilfunktion

Zur Ermittlung des Kostenbeitrags  $FKB_i$  werden die Teilfunktionen hinsichtlich der unter dem Kostenelement *Funktionskosten* aggregierten Kostenelemente  $j$  bewertet. Aufgrund der hohen Anzahl an Teilfunktionen wird auf eine Abbildung im Wirtschaftlichkeitsmodell verzichtet und stattdessen die Bewertung mittels Bewertungsmatrix durchgeführt, wie in Bild 5-17 dargestellt. Sie stellt die Teilfunktion-Lösungselement-Kombination in der Zeile den Kostenelementen in den Spalten gegenüber. Für jede Kombination wird eine Kosteneinschätzung abgegeben. Die Bewertungsskala sowie der -maßstab entsprechen dem in Abschnitt 5.2.1 in Tabelle 5-3 festgelegtem. Die Beurteilung der Kostenelemente erfolgt durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam im Rahmen eines Workshops.

Im Validierungsbeispiel wurde für die Teilfunktion *Energie verteilen* (Zeile 2) eine Lösungselementkombination aus dem Lösungsmuster *Mehrzieloptimierung*, sowie jeweils einer *Stromregelung* für die Batterien und den Doppelschichtkondensator gewählt. Die *Entwicklungskosten* (Spalte 1) wurden mit einer *sehr starken Kostenimplikation* ( $k_{i,EK} = 4$ ) bewertet, da es die Optimierungsalgorithmen auf das vorliegende Problem zu adaptieren und entsprechend umzusetzen gilt. Es fallen *Investitionskosten* (Spalte 2) mit einer *mittleren Kostenimplikation* ( $k_{i,IK} = 2$ ) insbesondere in Kow-how über Mehrzieloptimierungsverfahren an. Die Herstellkosten (Spalte 3) haben eine *mittelstarke Kostenimplikation* ( $k_{i,HK} = 3$ ), da ein Großteil der Lösung in der Entwicklung realisiert wird. Auf Basis der Bewertung kann neben dem Funktionskostenbeitrag  $FKB_i$  je Teilfunktion, auch die Kostenwerte  $k_j$  für die Kostenelemente  $j$ , ihre Gewichtungsfaktoren  $GF_j$  sowie der Kostenwert für das übergeordnete Kostenelement *Funktionskosten*  $k_{FK}$  berechnet werden (vgl. Gleichung 5-11).

$$k_j = \frac{\sum_{i=1}^I (k_{i,j} * FKB_i)}{100} \text{ mit } FKB_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^I k_i} * 100 \text{ und } k_i = \sum_{j=1}^J k_{i,j}$$

$$k_{FK} = \sum_{j=1}^J (k_j * GF_j) \text{ mit } GF_j = \frac{\sum_{i=1}^I k_{i,j}}{\sum_{i=1}^I k_i} * 100$$

Gleichung 5-11: Berechnung der Kostenwerte  $k_{FK}$  für funktionsabhängige Kostenelemente und den Funktionskostenbeitrag  $FKB_i$

Die berechneten Kostenwerte  $k_j$  und  $k_{FK}$  sowie die Gewichtungsfaktoren  $GF_j$  werden den Kostenelementen  $j, FK$  im Wirtschaftlichkeitsmodell zugewiesen (vgl. Bild 5-17).

<b>Kostenbewertungsmatrix</b> <b>Fragestellung:</b> Welche Implikation hat das Lösungselement bzw. deren Kombination i (Zeile) auf das Kostenelement j (Spalte)?  <b>Bewertungsskala:</b> 0 bis 5  <b>Bewertungsmaßstab:</b> Gesonderter Tabelle zu entnehmen (siehe Tabelle 5-3)			Entwicklungskosten $k_{i,EK}$	Investitionskosten $k_{i,IK}$	Herstellkosten $k_{i,HK}$	Teilfunktionskosten $k_i$	Funktionskostenbeitrag $FNB_i$ [%]
Nr.	Teilfunktion	Lösungselement bzw. -kombination					
1	Kommunikation mit Smart Grid ermöglichen	Kommunikationsmodul	2	0	1	2	0,84
2	Energie verteilen	Mehrzieloptimierung, DLC-Stromregelung, Batteriestromregelung	4	2	3	9	2,51
3	Energie aufnehmen	Linearmotor	3	1	4	8	2,23
4	Viel Energie abgeben	Gleichstromsteller, Zwischenkreis	1	0	2	3	0,84
5	Hohe Leistung abgeben						
6	Energie situationsabhängig abgeben	Intelligente Vorausschau	3	0	2	5	1,39
7	Energie speichern	Nickel-Metall-Hydrid-Batterien, Doppelschichtkondensatoren (DLC)	2	1	4	7	1,95
8	Sicherheit gewährleisten	Überspannungsschutz, Temperatursensor	2	1	2	5	1,39
9	Vertikale Kräfte dämpfen	GFK-Federn	1	0	1	2	0,56
10	Horizontale Kräfte dämpfen	Aktormodule	3	2	3	8	2,23
91	Daten weiterleiten	Datenfunk, Feldbus	2	1	4	7	1,95
Summe ( $\Sigma k_{i,EK}$ , $\Sigma k_{i,IK}$ , $\Sigma k_{i,HK}$ , $\Sigma k_i$ , $\Sigma FKB_i$ )			148	45	166	359	100
Kostenwert $k_j$ , $k_{FK}$			3	1	3		3
Gewichtungsfaktor $GF_j$ [%]			41	13	46		

3

41

13

46

Funktionskosten RailCab

Entwicklungskosten 3

Investitionskosten 1

Herstellkosten 3

Bild 5-17: Bewertung der Funktionskosten für die ausgewählte Lösungsvariante

### Zielkostenkontrolle

Im letzten Schritt wird zum Nachweis der relativen Wirtschaftlichkeit für jede Teilfunktion-Lösungselement-Kombination eine Zielkostenkontrolle durchgeführt. Hierzu werden diese im Zielkostenkontrolldiagramm hinsichtlich ihres Funktionsnutzenbeitrags  $FNB_i$  auf der Abszisse und dem Funktionskostenbeitrag  $FKB_i$  auf der Ordinate dargestellt. Bild 5-18 zeigt einen Ausschnitt aus dem Zielkostenkontrolldiagramm für die ausgewählte Lösungsvariante des Validierungsbeispiels. Teilfunktion-Lösungselement-Kombinationen (bspw. *Energie speichern*), welche sich innerhalb der Zielkostenzone befinden, sind relativ wirtschaftlich. Oberhalb der Zielkostenzone handelt es sich um kosten-treibende Teilfunktion-Lösungselement-Kombinationen (bspw. *Sicherheit gewährleisten*); unterhalb sind diese kostensenkend (bspw. *Energie/Leistung abgeben*). Werden

Teilfunktionen gemeinsam durch ein Lösungselement erfüllt, dann werden diese bei der Zielkostenkontrolle zusammengefasst. Der Funktionsnutzenbeitrag ergibt sich aus Addition der Teilnutzenbeiträge.

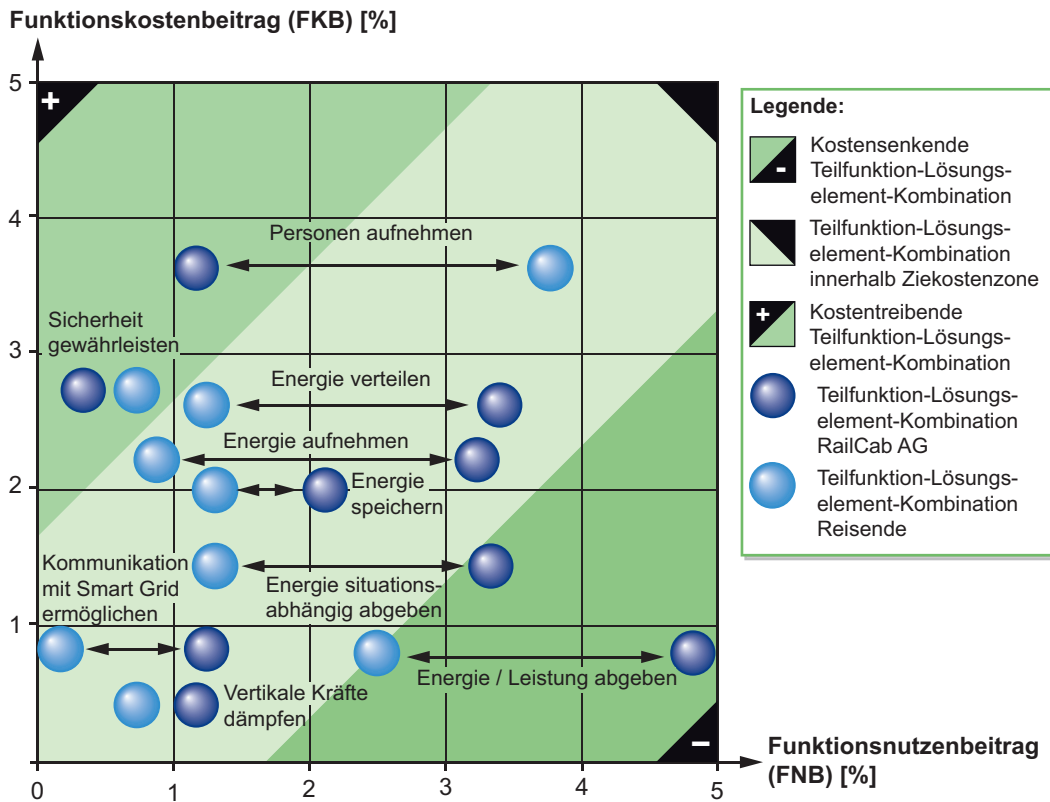


Bild 5-18: Zielkostenkontrolldiagramm der ausgewählten Lösungsvariante (Ausschnitt)

Beispiel hierfür sind die Funktionen *viel Energie abgeben* und *hohe Leistung abgeben*, sie wurden für die Zielkostenkontrolle zu *Energie/Leistung abgeben* zusammengefasst. Wie Bild 5-18 kann die Einordnung einer Teilfunktion-Lösungselement-Kombinationen je nach betrachtetem Stakeholder variieren, wie bspw. für *Personen aufnehmen*. Ziel im Rahmen der Konzipierung ist es, die Prinzipiellösung möglichst so zu verbessern, dass sich die Teilfunktion-Lösungselement-Kombinationen für alle Stakeholder innerhalb der Zielkostenzone oder in der Kostensenkungszone befinden.

Die Auswahl der weiterzuverfolgenden Lösungsvariante(n) erfolgt auf Basis der Kostenbewertung (vgl. Bild 5-17) und der Zielkostenkontrolle (vgl. Bild 5-18) durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam. Für diese wird im Rahmen der Konzipierung auf Gesamt- und Subsystemebene die Prinzipiellösung vervollständigt. Das prinzipielle Vorgehen wird im folgenden Abschnitt 5.3.4 kurz dargestellt.

### 5.3.4 Prinzipiösung

Für die in Abschnitt 5.3.3 ausgewählte(n) wirtschaftliche(n) Lösungsvariante(n) wird im Folgenden die Prinzipiösung vervollständigt. Wie in Abschnitt 2.5.6 aufgezeigt umfasst die Prinzipiösung neben den Partialmodellen *Umfeld* (Abschnitt 5.1.4), *Anwendungsszenarien* (Abschnitt 5.1.5), *Anforderungen* (Abschnitt 5.1.6) und *Funktionen* (Abschnitt 5.3.1) die Partialmodelle *Wirkstruktur*, *Gestalt*, *Verhalten* sowie das *Zielsystem*. Das Vorgehen zur Vervollständigung der Prinzipiösung wird im Folgenden zum besseren Verständnis kurz anhand des Validierungsbeispiels vorgestellt. Für eine detaillierte Beschreibung sei auf [Fra06, S. 103ff.], [ADG+09, S. 155ff.] und [ABD+14, S. 119ff.] verwiesen.

Die Lösungsmuster bzw. -elemente einer ausgewählten Lösungsvariante werden in der *Wirkstruktur* über Beziehungen verknüpft und so die Struktur des Systems abgebildet (vgl. Bild 5-19) [Fra06, S. 111ff.].

KAISER liefert ein *Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur* und ergänzt damit die Spezifikationstechnik CONSENS. Die Systemstruktur beinhaltet die Elemente und deren Beziehungen des zu entwickelnden Intelligenten Technischen Systems; sie unterscheidet nicht zwischen den Partialmodellen *Umfeld* und *Wirkstruktur*, sondern bildet diese auf verschiedenen Hierarchieebenen ab [Kai14, S. 8]. Das Vorgehen nach KAISER liefert klare Vorgaben zur Beschreibung der Elemente und ihrer Beziehungen. Sie bildet ihre Merkmale sowie Beziehungen in Form von Stoff-, Informations-, Energiebeziehungen sowie logischen Beziehungen und mechanischen Verbindungen ab [Kai14, S. 74ff.].

Im Partialmodell *Gestalt* werden grobe Angaben über die Gestalt des Systems gemacht (vgl. Bild 5-19). Es ist ein Modell der physischen Repräsentation der gestaltbehafteten Systemelemente aus der *Wirkstruktur* sowie deren Anordnung im Raum [Fra06, S. 115], [AEO04, S. 3ff.]. Auf Basis der Gestalt des Systems bewerten die Stakeholder bspw. das Nutzelement *Einstellung*, welches bspw. aus der Ästhetik des Systems resultiert. Darüber hinaus kann die Gestalt eines gestaltbehafteten Systemelements Einfluss auf die unter den Selbstkosten aggregierten Kostenelemente besitzen.

Systemelemente können einen Zustand einnehmen oder Aktivitäten ausführen. Das daraus resultierende Systemverhalten wird im Partialmodell *Verhalten* abgebildet. Zur Beschreibung des Systemverhaltens werden im Partialmodell *Verhalten* drei Arten von Modellen eingesetzt: Aktivitätsdiagramme, State Charts (Zustandsdiagramme) sowie Sequenzdiagramme.

Das *Zielsystem* repräsentiert die Ziele des Intelligenten Technischen Systems sowie ihre Verknüpfung. Sie beschreiben das geforderte, gewünschte oder zu vermeidende Verhalten des Systems (vgl. Abschnitte 2.3.1 und 5.1.5) [Fra06, S. 109f.]. Für eine detaillierte Darstellung des Vorgehens zur Erstellung des Zielsystems sei auf POOK [Poo11, S. 81ff.] verwiesen. Bild 5-19 zeigt einen Ausschnitt aus dem Zielsystem des RailCabs.

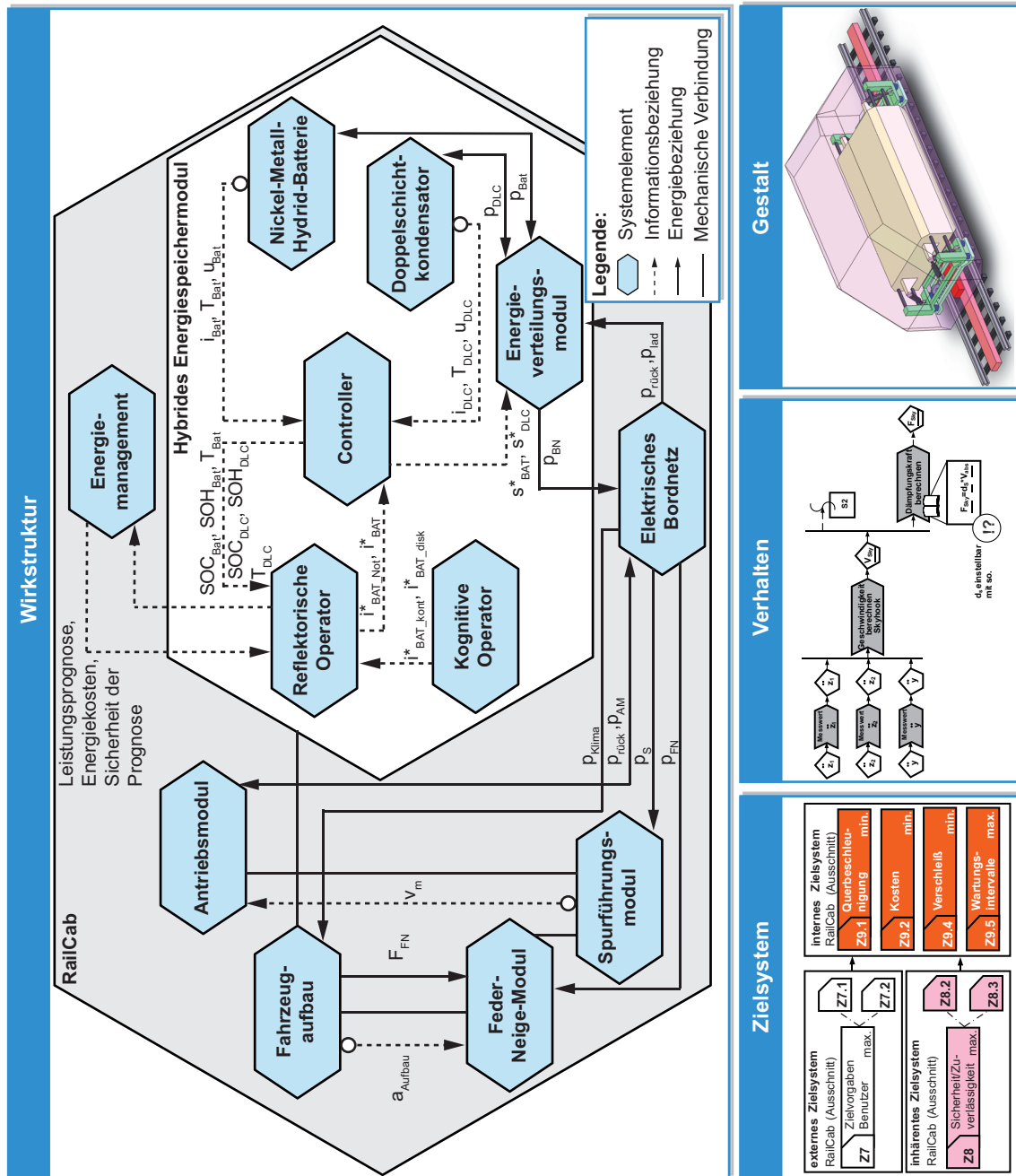


Bild 5-19: Wirkstruktur, Zielsystem, Verhalten und Gestalt des RailCabs in Anlehnung an [Fra06, S. 137ff.], [Dum11, S. 178], [Kai14, S. 76]



### 5.3.5 Bewertung der Prinzipi­lösung

Für die abschließende Bewertung der Prinzipi­lösung werden die funktions- und gesamtsystemabhängigen Kosten- und Nutzelemente im Rahmen eines Bewertungsworkshops durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam bewertet. Der Bewertungsprozess wird im Folgenden beschrieben.

#### Bewertung des erlebten Nutzens $n_{i,s}$

Im ersten Schritt wird für jedes funktions- und gesamtsystemabhängige Nutzelement  $i$  vor dem Hintergrund der vorliegenden Prinzipi­lösung ein erlebter Nutzen  $n_{i,s}$  bestimmt. Die Bewertungsskala und der -maßstab entsprechen dabei den für das Wirtschaftlichkeitsmodell vorgegebenen (vgl. Abschnitt 5.2.1, Tabelle 5-3). Der erlebte Nutzen  $n_{i,s}$  wird dem Nutzelement  $i$  als Eigenschaft im Wirtschaftlichkeitsmodell zugewiesen. Wie Bild 5-20 zeigt, wurden für diese Nutzelemente somit alle Eigenschaften vollständig zugewiesen. Wurden alle Nutzelemente auf einer Aggregationsstufe bewertet, ergibt sich der Nutzen  $n_{j,s}$  für dieses Element aus der Summe der gewichteten Teilnutzen (vgl. Gleichung 5-12). Wie bspw. für die Nutzelemente *Betrieb* und *Attribute RailCab*.

$$n_{j,s} = \sum_{i=1}^I (n_{i,s} * GF_i)$$

*Gleichung 5-12: Berechnung des erlebten Nutzens  $n_{j,s}$  für ein Nutzelement  $j$  auf oberster Aggregationsstufe*

#### Berechnung des Multiplikators Kundenzufriedenheit

Im nächsten Schritt kann nun die Kundenzufriedenheit berechnet werden. Die Berechnung erfolgt, wie in Abschnitt 5.2.4 beschrieben für jede Kano-Kategorie sowie je Stakeholder. Im Validierungsbeispiel erzielt die ausgewählte Prinzipi­lösung eine Gesamtzufriedenheit  $Z_R = 0,68$  für die Reisenden und  $Z_{RC} = 0,22$  für die Betreibergesellschaft RailCab AG. Für die RailCab AG wurde ein negativer Zufriedenheitsbeitrag innerhalb der Basisattribute erzielt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Nutzelement Instandhaltung (IH) lediglich mit  $n_{IH,RC} = 4$  bewertet wurde und somit unter dem erwarteten Nutzen  $e_{IH,RC} = 5$  liegt. Es gilt somit, die ausgewählte Prinzipi­lösung hinsichtlich ihrer Instandhaltbarkeit zu verbessern. Dies erfolgt im Rahmen der Analyse der Verlässlichkeit des Intelligenten Technischen Systems (vgl. Abschnitt 5.4). Da die Kundenzufriedenheit der RailCab AG noch innerhalb der Indifferenzzone liegt (vgl. Abschnitt 5.2.4), verändert sich der *Unternehmenswert NBP* nicht (vgl. Bild 5-20).

#### Bewertung der Kosten $k_{i,s}$

Die Bewertung der gesamtsystemabhängigen Kostenelemente  $i$  erfolgt, wie im ersten Schritt für den Nutzen, vor dem Hintergrund der vorliegenden Prinzipi­lösung. Die Bewertungsskala und der -maßstab entsprechen ebenfalls den Vorgaben in Abschnitt 5.2.1, Tabelle 5-3.

Die Kosten  $k_{i,S}$  werden den Kostenelementen  $i$  im Wirtschaftlichkeitsmodell zugewiesen (vgl. Bild 5-20). Wurden alle Kostenelemente auf einer Aggregationsstufe bewertet, ergeben sich die Kosten  $k_{j,S}$  für das übergeordnete Element aus der Summe der gewichteten Teilkosten (vgl. Gleichung 5-13).

$$k_{j,S} = \sum_{i=1}^I (k_{i,S} * GF_i)$$

Gleichung 5-13: Berechnung der Kosten  $k_{j,S}$  für ein Kostenelement  $j$  auf oberster Aggregationsebene

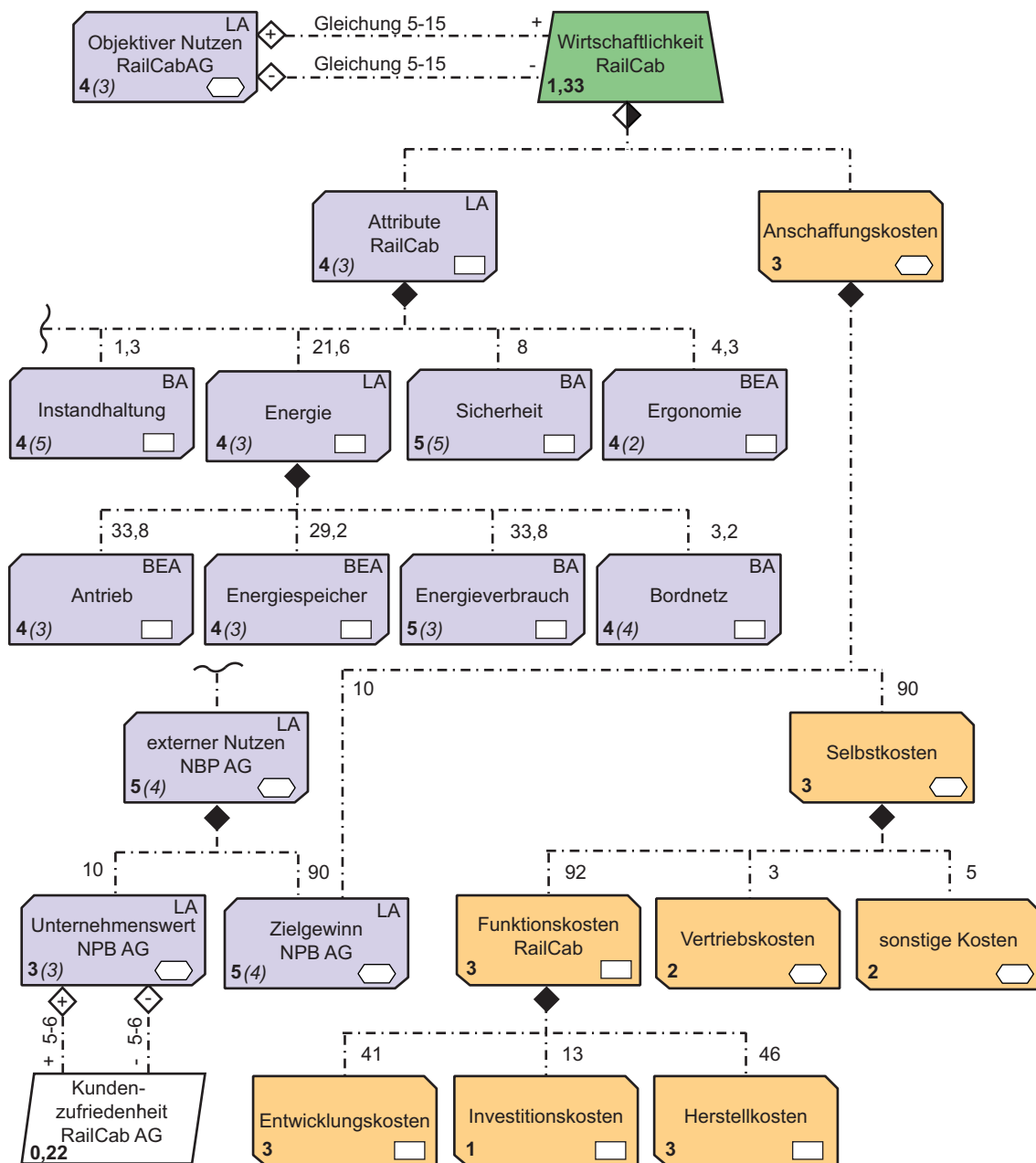


Bild 5-20: Bewertetes Wirtschaftlichkeitsmodell für die vorliegende Prinziplösung

## Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Abschließend kann auf Basis der bewerteten Kosten- und Nutzenelemente die Wirtschaftlichkeit für das Intelligente Technische System selbst sowie der daraus resultierende objektive Nutzen für den Stakeholder berechnet werden.

Die Wirtschaftlichkeit  $w_{i,S}$  für das Wirtschaftlichkeitselement  $i$  ergibt sich aus der Differenz zwischen den über eine Verhältnisbeziehung verbundenen Nutzen- und Kostenelemente, wie in Gleichung 5-14 dargestellt. Für die *Wirtschaftlichkeit des RailCabs* ergibt sich im Validierungsbeispiel  $w_{RC,RC} = 1,33$ .

$$w_{i,S} = \frac{n_{i,S}}{k_{i,S}}$$

Gleichung 5-14: Berechnung der Wirtschaftlichkeit  $w_{i,S}$

## Berechnung des objektiven Nutzens $n_{ON,S}$

Auf Basis der Wirtschaftlichkeit lässt sich im nächsten Schritt der *objektive Nutzen* wie in Gleichung 5-15 beschrieben berechnen. Übersteigen die Kosten den gelieferten Nutzen, so ergibt sich für  $w_{i,S} < 1$ . Die Prinziplösung ist somit nicht wirtschaftlich. Für den *objektiven Nutzen*  $n_{ON,S}$  ergibt sich ein Wert von *null*. Denn eine nicht wirtschaftliche Lösung liefert auch keinen Nutzen. Entsprechen sich die Bewertung von Nutzen und Kosten, so ergibt sich für  $w_{i,S} = 1$  und der *objektive Nutzen*  $n_{ON,S}$  entspricht dem mit dem Wirtschaftlichkeitselement verbundenen erwarteten Nutzen  $e_{i,S}$ . Die bewertete Prinziplösung ist somit relativ wirtschaftlich. Stiftet die bewertete Lösung mehr Nutzen als sie Kosten verursacht, so steigt der *objektive Nutzen*  $n_{ON,S}$  wie in Gleichung 5-15 aufgezeigt. Es gilt zu beachten, dass der Wert den maximalen Nutzwert  $e_{max}$  nicht übersteigen kann.

$$n_{ON,S} = 0 \text{ für } w_{i,S} < 1$$

$$n_{ON,S} = e_{i,S} \text{ für } w_{i,S} = 1$$

$$n_{ON,S} = e_{i,S} + f \text{ für } w_{i,S} > 1 \text{ mit } f = n_{i,S} - k_{i,S} \text{ für } e_{i,S} < e_{max}. \text{ sonst } f = 0$$

Gleichung 5-15: Abhängigkeit zwischen Wirtschaftlichkeit  $w_{i,S}$  und objektivem Nutzen  $n_{ON,S}$

Für die weitere Konzipierung des Intelligenen Technischen Systems hat das interdisziplinäre Entwicklungsteam, sofern nicht bereits erfolgt, sich für eine Lösungsvariante zu entscheiden. Die Entscheidung erfolgt auf Basis der Zufriedenheit der Stakeholder sowie der Wirtschaftlichkeit der Lösungsvarianten. Auf Basis der Bewertung kann das interdisziplinäre Entwicklungsteam zudem entscheiden, ob die bestehende Prinziplösung weiter verbessert werden soll. Dies kann bspw. durch die Auswahl neuer Lösungselemente erfolgen (vgl. Abschnitt 5.3.1). In den folgenden Abschnitten 5.4 und 5.5 werden die Bewertungen für die verlässlichkeitsabhängigen Kosten- und Nutzenelemente des Wirtschaftlichkeitsmodells ermittelt.

## 5.4 Bewertung der verlässlichkeitsabhängigen Elemente

Ziel dieser Phase ist die Bewertung des Spezialfalls der gesamtsystemabhängigen Elemente des Wirtschaftlichkeitsmodells, die von der Verlässlichkeit des Intelligenen Technischen Systems abhängen. Im Rahmen des Konzipierungsprozesses eignet sich für die Analyse der Verlässlichkeit insbesondere eine Kombination aus frühzeitiger Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) sowie Fehlerbaumanalyse (FTA) auf Basis der Prinzipiösung [Gau10, S. 103ff.], [DGG+13, S. 58ff.]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Vorgehen zur frühzeitigen Analyse der Verlässlichkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme auf Basis der Prinzipiösung [DG14, S. 38ff.], um Ansätze der Life Cost-Based FMEA nach RHEE/ISHII [RI02, S. 3f.], [RI04, S. 181f.], der Fehlerzustandsart-, -auswirkungs- und -kritizitätsanalyse (FMECA) [DIN60812, S. 7ff.] sowie um eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Sinne dieser Arbeit ergänzt. Ergebnis ist eine Fehlermöglichkeits-, Einfluss- und Fehlerkostenanalyse<sup>96</sup> (FMEFA). Die Bewertung erfolgt in zwei Stufen, zunächst für die bestehende Prinzipiösung (Abschnitt 5.4.1) und dann für die hinsichtlich der Verlässlichkeit verbesserte Prinzipiösung (Abschnitt 5.4.2).

### 5.4.1 Bewertung der verlässlichkeitsabhängigen Elemente für die bestehende Prinzipiösung

Im Rahmen der FMEFA entspricht das Vorgehen zur Identifikation von Ausfällen dem in Abschnitt 3.3.7 beschriebenen. Die identifizierten Ausfälle werden bewertet und in einer *Risikomatrix* dargestellt (vgl. Bild 5-21). Die verwendeten Bewertungsmaßstäbe sind an die AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG) angelehnt [Aut08], [DIN60812, S. 24ff.]. Die Bewertungsskala sowie der -maßstab wird im Anhang A3 dargestellt. Auf der Abszisse wird die Schwere der *Auswirkung*  $as_i$  der Ausfallart auf den Betrieb des Systemelements, dessen Umfeld oder den Benutzer bewertet. Je höher die Auswirkungen des Ausfalls, desto höher ist das Gefährdungspotential. Die *Entdeckungswahrscheinlichkeit*  $ew_i$  auf der Ordinate bewertet, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Fehlfunktion des Systems entdeckt wird, bevor es zu einem schwerwiegenden Ausfall des Systems kommt. Je geringer die Entdeckungswahrscheinlichkeit, desto höher ist das Gefährdungspotential. Die *Auftretenswahrscheinlichkeit*  $aw_i$  (Kugeldurchmesser) bewertet, wie wahrscheinlich das Auftreten der Ausfallart bezogen auf die angestrebte Lebensdauer des Intelligenen Technischen Systems ist. Im Rahmen der Konzipierung können mangels Informationen Schätzwerte<sup>97</sup> verwendet werden. Das interdisziplinäre Entwicklungsteam hat hierbei zu beachten, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit die Anzahl des Auftretens

---

<sup>96</sup> In Englisch: Failure Mode and Effects and Failure Cost Analysis.

<sup>97</sup> In der fortschreitenden Entwicklung, der Phase „*Entwurf und Ausarbeitung*“ kann die Auftretenswahrscheinlichkeit für die Systemelemente und ihre Ausfallarten basierend auf ihren eigenen spezifischen Ausfallraten und unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen berechnet werden [DIN60812, S. 24].

pro tausend Systeme innerhalb der angestrebten Lebensdauer widerspiegelt. Der Risikowert  $r_i$  für einen Ausfall ergibt sich wie in Gleichung 5-16 aufgezeigt.

$$r_i = aw_i * as_i * ew_i$$

*Gleichung 5-16: Berechnung des Risikowerts  $r_i$*

Hinsichtlich ihres Risikos werden vier Arten von Ausfällen unterschieden; je Ausfallart resultieren unterschiedliche Kosten sowie Maßnahmen für die Instandhaltung<sup>98</sup> des Systems:

- **Vernachlässigbare Ausfälle** besitzen ein geringes Risiko und lassen sich innerhalb eines geplanten Wartungsintervalls beheben. Für diese Art der Ausfälle treten somit lediglich Wartungskosten auf. Vernachlässigbare Ausfälle haben keinen Einfluss auf den Nutzen, da der Ausfall von den meisten Kunden nicht wahrgenommen wird. Zur Verbesserung der Prinzipiösung bietet sich für Ausfälle mit großem Kugeldurchmesser ggf. eine Erhöhung der Entdeckungswahrscheinlichkeit an. Auf diese Weise wird z.B. eine zustandsorientierte Instandhaltung realisiert und die Nutzungsdauer des Systemelements erhöht. Verbesserungsmaßnahmen sind jedoch kritisch hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu betrachten.
- **Akzeptable Ausfälle** sind erwartete Ausfälle mit überschaubarem Risiko. Sie können je nach Bedarf innerhalb von geplanten Wartungsintervallen oder durch korrektive Instandhaltung behoben werden. Akzeptable Ausfälle haben keinen nachhaltigen Einfluss auf den erlebten Nutzen, sofern der Abstand zwischen den Ausfällen groß genug ist. Sofern wirtschaftlich, kann die Prinzipiösung hinsichtlich der akzeptablen Ausfälle, bspw. durch die Erhöhung der Entdeckungswahrscheinlichkeit, verbessert werden.
- **Unerwünschte Ausfälle** sind risikobehaftet, weisen Gefährdungspotential auf und können den Verlust der Hauptfunktion des Systems zur Folge haben. Tritt ein unerwünschter Ausfall ein, sind je nach Auswirkung ggf. sofortige korrektive Maßnahmen zur Instandsetzung des Systems zu ergreifen. Im Rahmen der Entwicklung sind präventive Maßnahmen vorzusehen, mit denen die Fehlerursache frühzeitig identifiziert und somit ein Ausfall vermieden wird. Auf diese Weise kann auch die Auftretenswahrscheinlichkeit reduziert werden. Unerwünschte Ausfälle können zu Kundenunzufriedenheit führen.

---

<sup>98</sup> Instandhaltung bezeichnet die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie die des Managements während des Lebenszyklus eines Systems oder Systemelements. Die Maßnahmen dienen dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands [DIN13306, S. 6]. Gemäß DIN-Norm 31051 kann Instandhaltung in die vier Maßnahmen Wartung, Inspektion, Instandsetzung sowie Verbesserung unterteilt werden [DIN31051, S. 4]. Darüber hinaus wird zwischen präventiver, vorausbestimmter, zustandsorientierter, voraussagender, korrektiver, aufgeschobener korrektiver, sofortig korrektiver sowie geplanter Instandhaltung unterschieden [DIN13306, S. 22f.].

- **Kritische Ausfälle** weisen ein sehr hohes Risiko und somit auch ein hohes Gefährdungspotential auf – sie sind daher vorrangig zu behandeln. Zur Minimierung des Risikos und der resultierenden Kosten sind geeignete Verbesserungsmaßnahmen sowie Notfallstrategien zu definieren. Kritische Ausfälle bedingen eine sofortige korrektive Instandhaltung. Die Folge: Hohe Stillstands- und Instandsetzungszeiten sowie die daraus resultierenden Kosten; plus Opportunitätskosten<sup>99</sup>, Gewährleistungen und Haftungsansprüche. Diese Ausfälle haben eine hohe Kundenunzufriedenheit, Image- und Prestigeverlust sowie Rufschädigung und somit Kundenverluste zur Folge [DIN60300, S. 10f.], [RI04, S. 180ff.].

Die Einordnung der Ausfälle in der Risikomatrix dient dem interdisziplinären Entwicklungsteam als Anhaltspunkt für die anschließende Bewertung der von der Verlässlichkeit des Intelligenten Technischen Systems abhängigen Kostenelemente. Diese werden in der FMEFA<sup>100</sup>, wie in Abschnitt 5.3.3 für die Funktionskosten bewertet. Die Bewertungsskala und der -maßstab entsprechen dabei Tabelle 5-3.

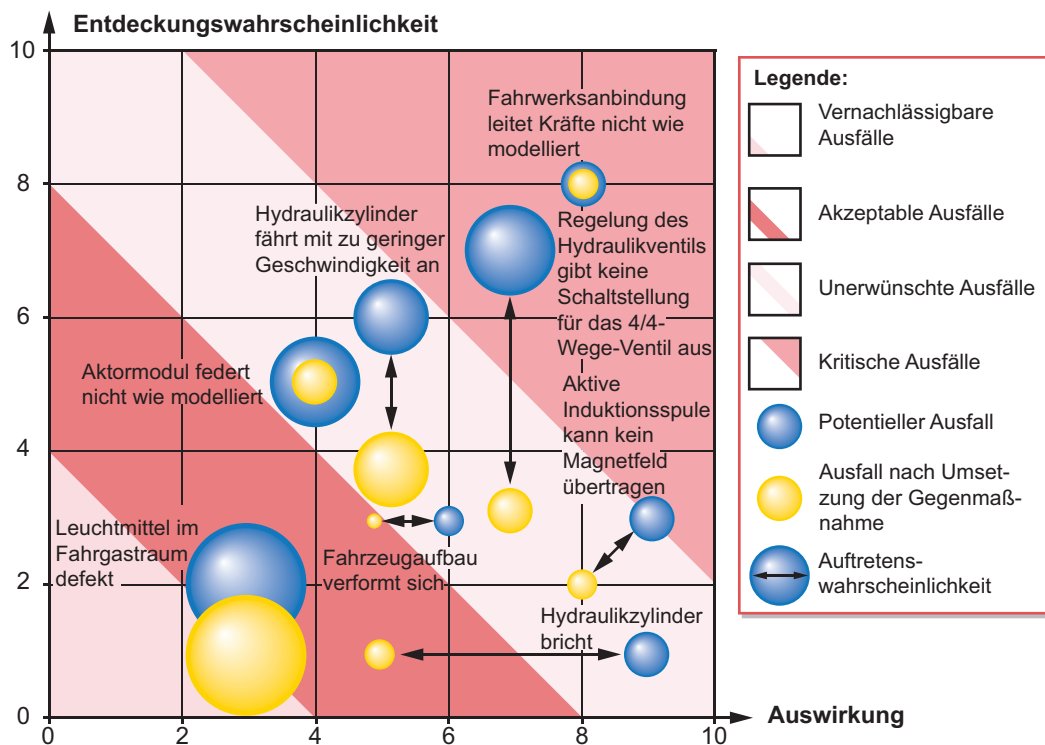


Bild 5-21: Risikomatrix in Anlehnung an [DIN60812, S. 22]

<sup>99</sup> Opportunitätskosten bezeichnen *entgangene Erträge oder Nutzen im Vergleich zur besten, nicht realisierten Handlungsalternative*, in diesem Fall das funktionsfähige System [Spr14c-ol].

<sup>100</sup> Die FMEFA baut auf den Ergebnissen der Arbeitskreise Sicherheit- und Stabilität sowie Demonstrator des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ auf. In diesem Rahmen wurde die zu Grunde liegende FMEA erstellt. Im Rahmen der Arbeit erfolgte die Bewertung hinsichtlich der Fehlerkosten.

Fehler-, Möglichkeits-, Einfluss- und Fehlerkostenanalyse (FMEFA)																					
Fragestellung: Wie ist der Ausfall i (Zeile) hinsichtlich der Bewertungsdimension j (Spalte) zu bewerten?																					
Bewertungsskala: 1 bis 10 bzw. 0 bis 5																					
Bewertungsmaßstab: Gesonderten Tabellen zu entnehmen (siehe Anhang A3 bzw. Tabelle 5-3)																					
Nr.	Systemelement	Potentielle Ausfälle	Potentielle Folgen	Potentielle Fehlerursachen	Auswirkung $as_i$	Entdeckungswahrscheinlich. $ew_i$	Auftretenswahrscheinlichkeit $aw_i$	Wartungskosten $k_{i,WK}$	Materialkosten $k_{i,MK}$	Instandsetzungskosten $k_{i,ISK}$	Opportunitätskosten $k_{i,OK}$	Instandhaltungskosten $k_{i,IHK}$	Gewährleistungskosten $k_{i,GK}$	Haftungskosten $k_{i,HFK}$	Summe Ausfallkosten $\Sigma k_i$						
41	Feder-Neige-Modul und Fahrzeugaufbau	Fahrzeugaufbau verformt sich	<div>1. Aufbau belastet Kräfteinleitungspunkt des Flansches nicht wie modelliert</div> <div>2. Flansch wird falsch belastet</div>	<div>1. Flansch kann modellierte Position vom Kräfteinleitungspunkt des Fahrzeugaufbaus nicht halten</div> <div>2. Flansch belastet Fahrzeugaufbau nicht wie modelliert</div> <div>3. Flansch verformt sich</div> <div>4. Aktormodul trägt den Fahrzeugaufbau nicht</div>	6	3	2	1	3	3	2	9	2	1	12						
46	Feder-Neige-Modul und Aktormodul	Aktormodul federt nicht wie modelliert	<div>1. Feder-Neige-Modul absorbiert die Stoßenergie vom Fahrwerk und die kinetische Energie vom Fahrzeugaufbau nicht wie modelliert</div>	<div>1. GFK-Feder belastet die Umlenkplatte nicht wie modelliert (Absorbierungsfehler)</div> <div>2. GFK-Feder belastet Fahrwerksanbindung nicht wie modelliert</div>	4	5	6	1	2	3	1	7	1	1	9						
52	Feder-Neige-Modul und Servozylinder und Regelung des Hydraulikventils	Regelung des Hydraulikventils gibt keine Schaltstellung für das 4/4-Wegeventil aus	<div>1. Ventil ändert den Druck an den Ausgängen nicht</div>	<div>1. Regelung des Servozylinders gibt keine Sollschieberlage mehr vor</div> <div>2. Regelung Hydraulikventil defekt</div> <div>3. Energieversorgung der Regelung des Hydraulikventils unterbrochen</div>	7	6	6	1	2	3	0	5	2	0	7						
Summe ( $\Sigma as_i, \Sigma ew_i, \Sigma aw_i, \Sigma k_{i,WK}, \Sigma k_{i,MK}, \Sigma k_{i,ISK}, \Sigma k_{i,OK}, \Sigma k_{i,IHK}, \Sigma k_{i,GK}, \Sigma k_{i,HFK}$ )					923	596	390	165	254	235	125	799	206	31	1015						
Summe $\Sigma r_i$ und Gewichtungsfaktor $GF_i$					13826										21	32	34	16	77	20	3

Bild 5-22: Bewertung der bestehenden Prinziplösung mit der FMEFA (Auszug)

Im ersten Schritt der Kostenbewertung werden die unter den *Instandhaltungskosten*  $k_{i,IHK}$  aggregierten Kostenelemente sowie die *Gewährleistungskosten*  $k_{i,GK}$  und die *Haftungskosten*  $k_{i,HFK}$  bewertet, wie in Bild 5-22 dargestellt. Die Kostenwerte für die *Instandhaltungskosten*  $k_{i,IHK}$  und die *erwarteten Ausfallkosten*  $k_{i,EAK}$  berechnen sich im Anschluss gemäß Gleichung 5-17.

$$k_{i,j} = \sum_{j=1}^J k_{i,j} \text{ für } j \in (IHK, EAK)$$

$$GF_j = \frac{\sum_{i=1}^i (k_{i,j} * \frac{aw_i}{aw_{max.}})}{\sum_{j=1}^j \sum_{i=1}^i (k_{i,j} * \frac{aw_i}{aw_{max.}})}$$

Gleichung 5-17: Berechnung Instandhaltungskosten  $k_{i,IHK}$  und erwarteten Ausfallkosten  $k_{i,EAK}$

Die Gesamtkosten je Kostenelement sind von der Auftretenswahrscheinlichkeit des Ausfalls  $aw_i$  abhängig. Dies wird ebenfalls bei der Berechnung ihrer Gewichtungsfaktoren  $GF_j$  berücksichtigt. Auf Basis des identifizierten Risikos sowie der *erwarteten Ausfallkosten*  $k_{i,EAK}$  lassen sich die Ausfälle für die nachfolgende Verbesserung priorisieren.

#### 5.4.2 Bewertung der verlässlichkeitsabhängigen Elemente für die verbesserte Prinziplösung

Zur Verbesserung der Prinziplösung werden für die gefundenen Ausfälle Gegenmaßnahmen zur Minimierung der Auswirkung bzw. zum Abstellen des Ausfalls identifiziert. Zur Umsetzung der Maßnahme wird ein Verantwortlicher aus dem interdisziplinären Entwicklungsteam bestimmt [DG11, S. 7]. Es wird mit den kritischen und kostenintensiven Ausfällen begonnen, da diese vorrangig durch geeignete Gegenmaßnahmen<sup>101</sup> zu behandeln sind. Sie können in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Intelligenten Technischen Systems greifen. Gegenmaßnahmen, welche erst außerhalb der Konzipierung greifen, können bereits in der Konzipierung vorgesehen und ihre Wirksamkeit und Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Systems bewertet werden.

<sup>101</sup> Im Rahmen der Konzipierung kann eine Steigerung der Verlässlichkeit durch die Erweiterung der Prinziplösung erfolgen, bspw. durch redundante Auslegung eines Systemelements, Integration von Systemelementen zur Online-Überwachung oder die Anwendung des Mehrstufigen-Verlässlichkeitskonzepts [DG11, S. 7], [DGM+14, S. 47ff.]. Maßnahmen für den disziplinspezifischen Entwurf und Ausarbeitung können u.a. Test-, Simulations- oder Validierungsschritte sein. Geeignete Methoden für diese Phase liefert u.a. GAUSEMEIER ET AL. [GRS+14, S. 37ff.]. Im Rahmen der Produktion des Systems können Qualitätssicherungsmaßnahmen, wie Six Sigma oder Lean Management (vgl. u.a. [Bas09], [TK08], [Zol13]), die Verlässlichkeit sicherstellen [DIN60812, S. 30]. Während des Betriebs des Intelligenten Technischen Systems wird die Verlässlichkeit durch die zuvor getroffenen Maßnahmen sichergestellt. Der Einsatz von Selbstoptimierung ermöglicht es dem System auch in sicherheitskritischen Situationen einen zuverlässigen Systembetrieb aufrecht zu erhalten [DHK+09, S. 6].



Fehler-, Möglichkeits-, Einfluss- und Fehlerkostenanalyse (FMEFA)																
Fragestellung: Wie ist der Ausfall i (Zeile) nach Durchführung der Abstellmaßnahme hinsichtlich der Bewertungsdimension j (Spalte) zu bewerten?																
Bewertungsskala: 1 bis 10 bzw. 0 bis 5																
Bewertungsmaßstab: Gesonderten Tabellen zu entnehmen (siehe Anhang A3 bzw. Tabelle 5-3)																
Nr.	Systemelement	Potentielle Ausfälle	Abstellmaßnahmen	Verantw.	Auswirkung $as_i$	Entdeckungswahrscheinlich. $ew_i$	Auftretenswahrscheinlichkeit $aw_i$	Risikoreduktion [%]	Wartungskosten $k_{i,WK}$	Materialkosten $k_{i,MK}$	Instandsetzungskosten $k_{i,ISK}$	Opportunitätskosten $k_{i,OK}$	Instandhaltungskosten $k_{i,IHK}$	Gewährleistungskosten $k_{i,GK}$	Haftungskosten $k_{i,HFK}$	Erwartete Ausfallkosten $k_{i,EAk}$
41	Feder-Neige-Modul und Fahrzeugaufbau	Fahrzeugaufbau verformt sich	Konstruktiv: Belastung des Aufbaus, des Aktormoduls und des Flansches durch Kräfte modellieren und Modell des Aufbaus durch Simulation optimieren	K.A.	5	1	1	58	1	3	3	2	9	2	1	12
46	Feder-Neige-Modul und Aktormodul	Aktormodul federt nicht wie modelliert	Konstruktiv: Dynamikmodell des Gesamtfahrzeugs erstellen, um Fahrzeugdynamik bei auftretenden Kräften zu simulieren	K.A.	4	3	3	50	1	2	3	1	7	1	1	9
52	Feder-Neige-Modul und Servozylinder und Regelung des Hydraulikventils	Regelung des Hydraulikventils gibt keine Schaltstellung für das 4/4-Wege-Ventil aus	Kommunikation an das 4/4-Wege-Ventil überwachen, ggf. Warmmeldung generieren, Stromversorgung überwachen	K.A.	7	3	3	75	1	2	3	0	5	2	0	7
					722	409	275		144	206	172	93	615	161	23	799
					Summe ( $\sum as_p, \sum ew_i, \sum aw_p, \sum k_{i,j} \cdot aw_i$ )											
Summe $\sum r_i$ ; Risikoreduktion [%]; Gewichtungsfaktor GF <sub>j</sub> und Kostenreduktion [%]					5688											
					Kostenwert $k_j$											

Bild 5-23: Bewertung der Gegenmaßnahmen mit der FMEFA (Auszug)

Es gilt zu beachten, dass die getroffenen Maßnahmen auch Einfluss auf die in der FTA dargestellten Ausfallfortpflanzung haben können. *Common Cause Failure* lassen sich so ggf. durch Abstellen der gemeinsamen Ursache beheben. Die identifizierten Gegenmaßnahmen werden, wie in Abschnitt 5.4.1 beschrieben, hinsichtlich ihrer Risikopriorität bewertet und dokumentiert (vgl. Bild 5-23).

Die Kostenbewertung wird aus Abschnitt 5.4.1 übernommen, da sich diese voraussichtlich beim Eintreten des Ausfalls nicht ändern werden. Eine Anpassung erfolgt dort, wo bspw. die Entdeckungswahrscheinlichkeit durch Wartungsmaßnahmen erhöht werden konnte. Eine Kostenreduktion erfolgt insbesondere durch die Reduktion der Auftretenswahrscheinlichkeit des Ausfalls. Es gilt zu beachten, dass bei Änderungen an der Prinzipiellösung die bereits in Abschnitt 5.3.5 bewerteten funktions- und gesamtsystemabhängigen Kosten- und Nutzelemente unter Berücksichtigung der Änderungen ebenfalls erneut zu bewerten sind, wenn bspw. konstruktive Gegenmaßnahmen oder redundante Systemauslegung als Gegenmaßnahme gewählt werden. Die Wirksamkeit einer Gegenmaßnahme lässt sich auf Basis der Risikoreduktion sowie der Kostensteigerung bzw. -senkung bewerten.

Im Validierungsbeispiel konnte eine Reduktion der *erwarteten Ausfallkosten* von 23 Prozent erreicht werden. Die *Funktionskosten* stiegen im Vergleich lediglich um 2 Prozent. Zudem ist der Anteil der *Entwicklungskosten* leicht gestiegen. Insgesamt konnte eine Kostenreduktion von 15 Prozent erzielt werden. Der Nutzen für das Nutzelement *Instandhaltung* steigt durch die Anpassungen der Prinzipiellösung. Die Kundenzufriedenheit für die RailCab AG konnte dadurch auf  $Z_{RC} = 0,48$  (vorher 0,22) gesteigert werden. Der negative Wert für die Basisattribute konnte auf Indifferenzlevel gehoben werden.

## 5.5 Bewertung der situationsabhängigen Elemente

In dieser Phase werden die vom Betrieb des Intelligenten Technischen Systems abhängigen Elemente des Wirtschaftlichkeitsmodells bewertet. Hierfür wird das prinzipielle Verhalten des Systems in verschiedenen Betriebssituationen simuliert und die Kosten- und Nutzelemente situationsabhängig bewertet. Die vorliegende Arbeit liefert ein Vorgehen<sup>102</sup> zur frühzeitigen Analyse der Systemdynamik Intelligenter Technischer Systeme und zur Bewertung der situationsabhängigen Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell.

---

<sup>102</sup> Das Vorgehen basiert auf den Vorarbeiten der Autorin zur frühzeitigen Analyse der Systemdynamik selbstoptimierender Systeme [Vaß14, S. 174ff.], [VG14, S. 411ff.]. Im Rahmen der Arbeit wurden das Vorgehen vereinfacht und Bewertungsschritte automatisiert. Auf diese Weise kann eine bessere Handhabbarkeit gewährleistet werden.

Da die Dynamik eines Systems stark vom betrachteten System abhängig ist, erfolgt die Modellerstellung<sup>103</sup> durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam für jede neue Entwicklungsaufgabe. Hierzu wird das im Rahmen der Arbeit entwickelte und im Folgenden beschriebene Schema verwendet. Im Rahmen des Validierungsbeispiels werden die folgenden situationsabhängigen Elemente bewertet: *Energieverbrauch*, *Reisedauer*, *Komfort*, *Energiekosten* und *Fahrtkosten*. Hierzu werden in Abschnitt 5.5.1 die relevanten Aspekte des Intelligenen Technischen Systems für die Simulation identifiziert. Auf ihrer Basis wird der Selbstoptimierungsprozess des Systems in Abschnitt 5.5.2 abgebildet und das Simulationsmodell erstellt. Abschließend wird in Abschnitt 5.5.3 das Modell simuliert und die situationsabhängigen Kosten- und Nutzenelemente im Wirtschaftlichkeitsmodell bewertet.

### 5.5.1 Identifikation der relevanten Aspekte

Im ersten Schritt werden gemäß Abschnitt 2.3.1 (Bild 2-6) die für den Entwicklungsgegenstand relevanten Aspekte des Intelligenen Technischen Systems auf Basis der Prinziplösung identifiziert. Der Aufwand für die Modellerstellung sowie -simulation steigt mit der Anzahl der ausgewählten Aspekte. Das interdisziplinäre Entwicklungsteam wählt daher die relevanten Aspekte sowie den Detaillierungsgrad auf Basis der verfügbaren Ressourcen aus. Es ist nicht Ziel des Simulationsmodells, das Verhalten des zu entwickelnden Intelligenen Technischen Systems vollumfänglich abzubilden, vielmehr soll ein prinzipielles Systemverständnis geschaffen und auf dieser Basis die situationsabhängigen Kosten- und Nutzenelemente bewertet werden. Bild 5-24 zeigt einen Ausschnitt der Aspekte, welche im Validierungsbeispiel berücksichtigt werden.

Im ersten Schritt werden die Einflussfaktoren auf das Intelligente Technische System identifiziert. Die äußeren Einflüsse, wie bspw. die Leistungsübertragung aktuell, lassen sich aus dem Umfeldmodell in Abschnitt 5.1.4 ableiten. Die Benutzervorgaben resultieren aus dem externen Zielsystem und den Anwendungsszenarien für den Betrieb in Abschnitt 5.1.5. Ein Beispiel für eine Benutzervorgabe sind die gewünschten Fahrtkosten oder die Streckenlänge, welche durch Start- und Zielort determiniert wird. Mit den Benutzervorgaben wird der erwartete Nutzen  $e_{i,S}$  für die korrespondierenden Nutzenelemente in jeder Situation vorgegeben. Der Systemzustand ergibt sich aus der Wirkstruktur in Abschnitt 5.3.4. Für die identifizierten Einflussfaktoren werden mögliche Ausprägungen durch die Entwickler festgelegt. Anregungen für die Ausprägungen der Einflussfaktoren liefern die Anwendungsszenarien in Abschnitt 5.1.5. Eine qualitative Unterschei-

---

<sup>103</sup> Die Modellerstellung und -simulation wurde in einem Excel-Tool (Simulationstool) im Rahmen der Arbeit prototypisch für das Validierungsbeispiel umgesetzt. Das Vorgehen bei der Erstellung des Modells wird in diesem Abschnitt dargestellt. Das bestehende Simulationstool dient als Grundlage zur Erstellung von Simulationsmodellen für andere Systeme. Zur Anpassung werden rudimentäre Programmierkenntnisse vorausgesetzt.

dung der Ausprägungen ist in der frühen Phase ausreichend [Dum11, S. 102]. Der Lade-grad (State of Charge –SOC) des Hybriden Energiespeichersystems kann beispielweise wie folgt ausgeprägt sein:  $0,2 < SOC < 0,4$ , wobei der Wert 1 einen vollständig geladenen Energiespeicher repräsentiert.

Im nächsten Schritt werden die **Ziele** des Intelligenten Technischen Systems, wie bspw. *Komfort maximieren*, auf Basis des Zielsystems in Abschnitt 5.3.4 ausgewählt, welche für die zu bewertenden Kosten- und Nutzelemente relevant sind. Abschließend werden die **Parameter**<sup>104</sup> identifiziert, welche den Betriebspunkt des Systems beschreiben. Im Validierungsbeispiel bestimmt der Betriebspunkt die Energieverteilung an die Funktionsmodule des RailCabs. Darüber hinaus werden das Verhalten und die veränderlichen Größen im System identifiziert. Anregungen für das abzubildende **Verhalten** des Systems geben die Wirkstruktur sowie die Verhaltensmodelle in Abschnitt 5.3.4. Die mathematische Beschreibung erfolgt durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam auf Basis ihres Erfahrungswissens. Im Validierungsbeispiel kann bspw. der Energiespeicher geladen oder entladen werden, sowie der Nutzen für *Komfort* und *Reisedauer* durch das Systemverhalten verändert werden.

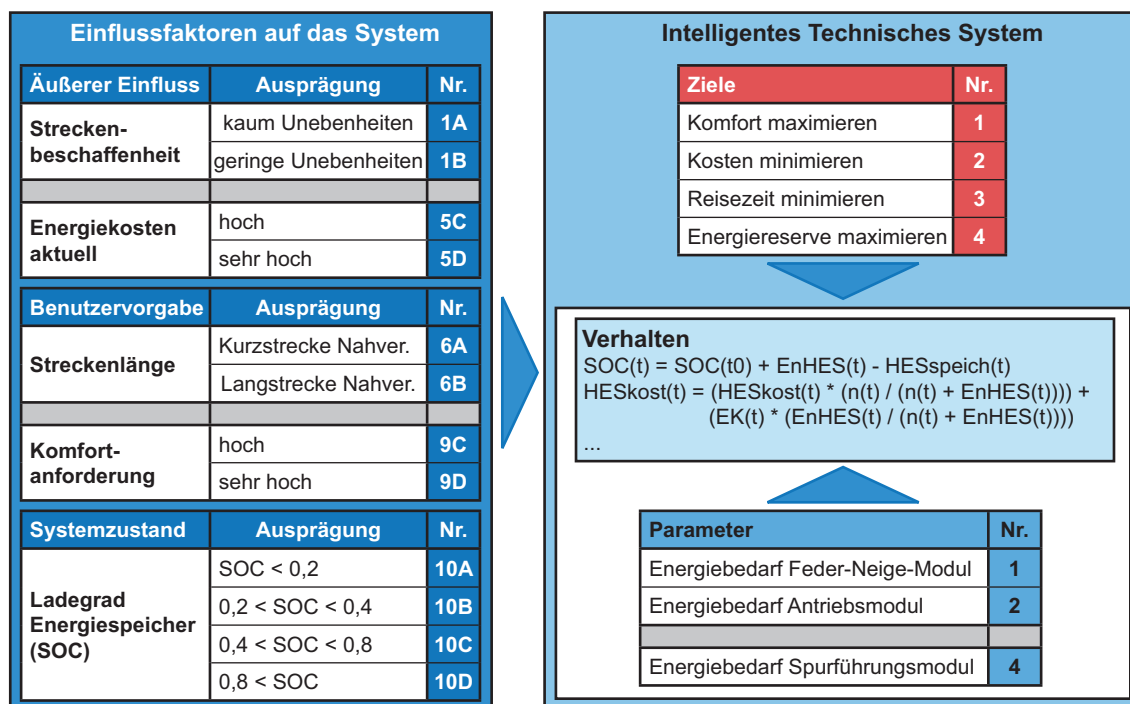


Bild 5-24: Identifikation der Aspekte des Intelligenten Technischen Systems (Ausschnitt)

<sup>104</sup> Eine Strukturanpassung des Systems wird im Rahmen der Methode aus Komplexitätsgründen nicht berücksichtigt.

### 5.5.2 Simulation des Systembetriebs

Auf Basis der identifizierten Aspekte aus Abschnitt 5.5.1 wird der Selbstoptimierungsprozess (vgl. Abschnitt 2.3.2) im Simulationsmodell abgebildet und der Systembetrieb simuliert. Im Folgenden wird sowohl die Erstellung des Simulationsmodells als auch die Simulation integrativ dargestellt. Bei der Beschreibung wird zwischen Modellerstellung (initial) und Simulation (je Simulationsschritt) unterschieden.

#### 5.5.2.1 Analyse der Ist-Situation

Ein Intelligentes Technisches System analysiert im Betrieb kontinuierlich seine Ist-Situation. Im Simulationsmodell wird die Ist-Situation durch Betriebssituationen und deren Bündelung zu Betriebsfällen repräsentiert. Innerhalb eines Betriebsfalls werden die zugehörigen Betriebssituationen während der Simulation variiert.

##### Modellerstellung

Die Betriebssituationen werden initial vor der Simulation des Modells erstellt. Eine **Betriebssituation** ist eine konsistente Kombination von Ausprägungen der äußeren Einflüsse und Benutzervorgaben aus Bild 5-24. Zur Entwicklung von Betriebssituationen werden die Ausprägungen mit Hilfe der in Bild 5-25 dargestellten Konsistenzmatrix, hinsichtlich ihrer Verträglichkeit analysiert.

Die **Konsistenzmatrix** basiert auf einem paarweisen Vergleich der Ausprägungen unter der Fragestellung: Tritt die Ausprägung  $i$  (Zeile) mit der Ausprägung  $j$  (Spalte) innerhalb einer Betriebssituation auf? In der Matrix wird lediglich eine Seite bewertet, da es sich um eine nicht gerichtete Bewertung handelt [GP14, S. 62]. Mit Hilfe der Konsistenzanalyse<sup>105</sup> werden auf Basis der Konsistenzmatrix Betriebssituationen gebildet, welche jeweils eine Ausprägung je Einflussfaktor beinhalten. Im Rahmen des Validierungsbeispiels wurden 152908 konsistente Kombinationen gebildet. Hiervon wurden 104 konsistente Betriebssituationen zur weiteren Betrachtung ausgewählt.

Im nächsten Schritt werden die Betriebssituationen zu Betriebsfällen gebündelt. Ein **Betriebsfall** ist ein Bündel von Betriebssituationen, welche auf Grund eines Einflussfaktors zusammengefasst wurden. Zur Clusterung der Betriebssituationen zu Betriebsfällen wählt das Entwicklungsteam einen Einflussfaktor als Kriterium aus. Im Validierungsbeispiel wurde der Faktor *Streckenlänge* (Spalte 6) ausgewählt und die Situationen entsprechend gebündelt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Betriebsfalls ist abhängig davon, wie häufig dieser im Betrieb auftritt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit  $EW_i$  der Betriebsfälle

---

<sup>105</sup> Für eine ausführliche Beschreibung des Vorgehens bei der Konsistenzanalyse sei auf [GP14, S. 62ff.] verwiesen. Die Analyse wird durch die Szenario-Software unterstützt. Sie wurde zur Erstellung von Szenarien vom Heinz Nixdorf Institut und der Unternehmensberatung UNITY AG entwickelt (www.szenario-software.de). Das Ergebnis ist in das Simulationstool zu übertragen.

wird mit Hilfe einer Gewichtungsmatrix (vgl. Abschnitt 5.2.2 und Bild 5-8) unter folgender Fragestellung bewertet: Tritt der Betriebsfall i (Zeile) im Systembetrieb häufiger auf als der Betriebsfall j (Spalte)?

Ergebnis sind die Betriebsfälle und die zugehörigen Betriebssituationen, welche im Simulationsmodell hinterlegt werden.

Konsistenzmatrix (Ausschnitt)		Ausprägung / Einflussfaktor	Energiekosten aktuell	Streckenlänge	Reisezeit				Fahrtkosten			
Fragestellung: Tritt die Ausprägung i (Zeile) mit der Ausprägung j (Spalte) innerhalb einer Betriebssituation auf?					sehr kurz	möglichst kurz	mittlere	längere	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Bewertungsmaßstab: 1 = totale Inkonsistenz 2 = partielle Inkonsistenz 3 = neutral oder unabhängig voneinander 4 = gegenseitige Begünstigung 5 = starke gegenseitige Unterstützung												
Einflussfaktor	Ausprägung	Nr.	5	6	7A	7B	7C	7D	8A	8B	8C	8D
Energiekosten aktuell	niedrig	5A		...	3	3	3	3	3	3	3	3
	mittel	5B		...	3	3	3	3	3	3	3	3
	hoch	5C		...	3	3	3	3	3	3	3	3
	sehr hoch	5D		...	3	3	3	3	3	3	3	3
Streckenlänge	Kurzstrecke Nahverkehr	6A			5	4	2	1	5	2	1	1
	Langstrecke Nahverkehr	6B			2	3	3	3	4	3	3	2
	Kurzstrecke Fernverkehr	6C			4	4	3	2	4	3	2	1
	Langstrecke Fernverkehr	6D			1	2	1	1	2	1	1	1
	Mittelstrecke Fernverkehr	6E			2	3	3	3	3	3	3	3
Reisezeit	...											
Fahrtkosten	...											

Ergebnis der Konsistenzanalyse:  
104 Betriebs-situationen

Clustering der Betriebssituationen zu Betriebsfällen und Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit											Eintrittswahrscheinlichkeit EW <sub>i</sub>	
		Einflussfaktor	Streckenbeschaffenheit	Progn. Leistungsübertragung	Leistungsübertragung aktuell	Prognose Energiekosten	Energiekosten aktuell	Streckenlänge	Reisezeit	Fahrtkosten		Komfortanforderungen
Betriebsfall		Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kurzstrecke Nahverkehr	1	A	C	C	B	A	A	A	B	A	A	0,27
	2	A	C	C	A	A	A	A	B	A	A	
	3	B	C	C	B	A	A	A	B	A	A	
Mittelstrecke Fernverkehr	83	C	C	C	B	A	F	C	B	B		0,2
	96	D	C	C	A	A	F	A	D	D		
Summe											1	

Bild 5-25: Vorgehen zur Entwicklung von Betriebssituationen und -fällen

## Simulation

Während der Simulation wird zunächst ein Betriebsfall, bspw. *Kurzstrecke Nahverkehr* ausgewählt. Dem Betriebsfall ist eine Dauer  $t$  in Zeiteinheiten zugewiesen. Im vorliegenden Beispiel entspricht  $t = 3 \text{ ZE}$ . Innerhalb des Betriebsfalls wird im nächsten Schritt eine Betriebssituation (Nr. 1 in Bild 5-25) ausgewählt und ebenfalls eine Dauer  $d = 3 \text{ ZE}$  zugewiesen. Für die Betriebssituation werden dann die Systemziele bestimmt.

### 5.5.2.2 Bestimmung der Systemziele

Die Anpassung der Systemziele wird bei einer Änderung der Einflüsse auf das Intelligente Technische System notwendig. Sie erfolgt durch die Veränderung der Ausprägung bzw. Gewichtung der aktuellen Ziele.

## Modellerstellung

Die Zielpriorität wird durch die Ausprägungen der Einflussfaktoren beeinflusst. Die Priorisierung der Systemziele erfolgt im Simulationsmodell mit Hilfe des Analytic Hierarchy Process (AHP) nach SAATY [Saa80, S. 17ff.].

Eine manuelle Bewertung der Zielprioritätsmatrix durch die Entwickler würde einen sehr hohen Bewertungsaufwand bedeuten. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Arbeit die Befüllung der Zielprioritätsmatrizen für die jeweilige Betriebssituation automatisiert. Hierzu bewertet das Entwicklungsteam initial eine **Zielrangfolgenmatrix** (vgl. Bild 5-26). Diese stellt die Einflussfaktoren und deren Ausprägungen den Zielen gegenüber. Die Bewertung erfolgt zeilenweise unter der Fragestellung: In welcher Rangfolge werden die Ziele  $i$  (Spalte) beim Eintreten der Ausprägung  $j$  (Zeile) priorisiert?

Im zweiten Schritt werden **Transformationsregeln** für die automatisierte Befüllung der Zielprioritätsmatrix definiert. Sie definieren in Abhängigkeit der Ränge zweier Ziele, welche Bedeutung einem Ziel  $Z_1$  gegenüber einem Ziel  $Z_2$  zugewiesen wird. Der Bewertungsmaßstab reicht von *eins* (gleichbedeutend) bis *neun* (absolut dominierend).

## Simulation

Bild 5-26 zeigt das Vorgehen bei der Bestimmung der Systemziele am Beispiel der zuvor ausgewählten Betriebssituation. Für jede Einflussfaktor-Ausprägungs-Kombination der Betriebssituation ist zunächst eine individuelle Zielpriorität zu berechnen und diese dann zu einer Zielgewichtung zu konsolidieren. Auf Basis der Transformationsregeln befüllt das Simulationstool<sup>106</sup> die Zielprioritätsmatrizen für die Einflussfaktoren für jeder Betriebssituation, wenn diese auftritt. Durch Normierung des Eigenvektors der konsolidier-

---

<sup>106</sup> Das Simulationstool nutzt zur Berechnung der Zielpriorität nach der AHP-Methode das Excel Templates Version 2014-07-27 von GOEPEL [Goe13-ol], [Goe13].

ten Zielprioritätsmatrix resultieren die Zielgewichtungen  $ZG_i$  für die vorliegende Betriebssituation. Im Beispiel wird das Ziel *Kosten minimieren* in der aktuellen Situation am höchsten priorisiert. Nach der Bestimmung der Systemziele erfolgt im nächsten Schritt die zielkonforme Anpassung des Systemverhaltens.

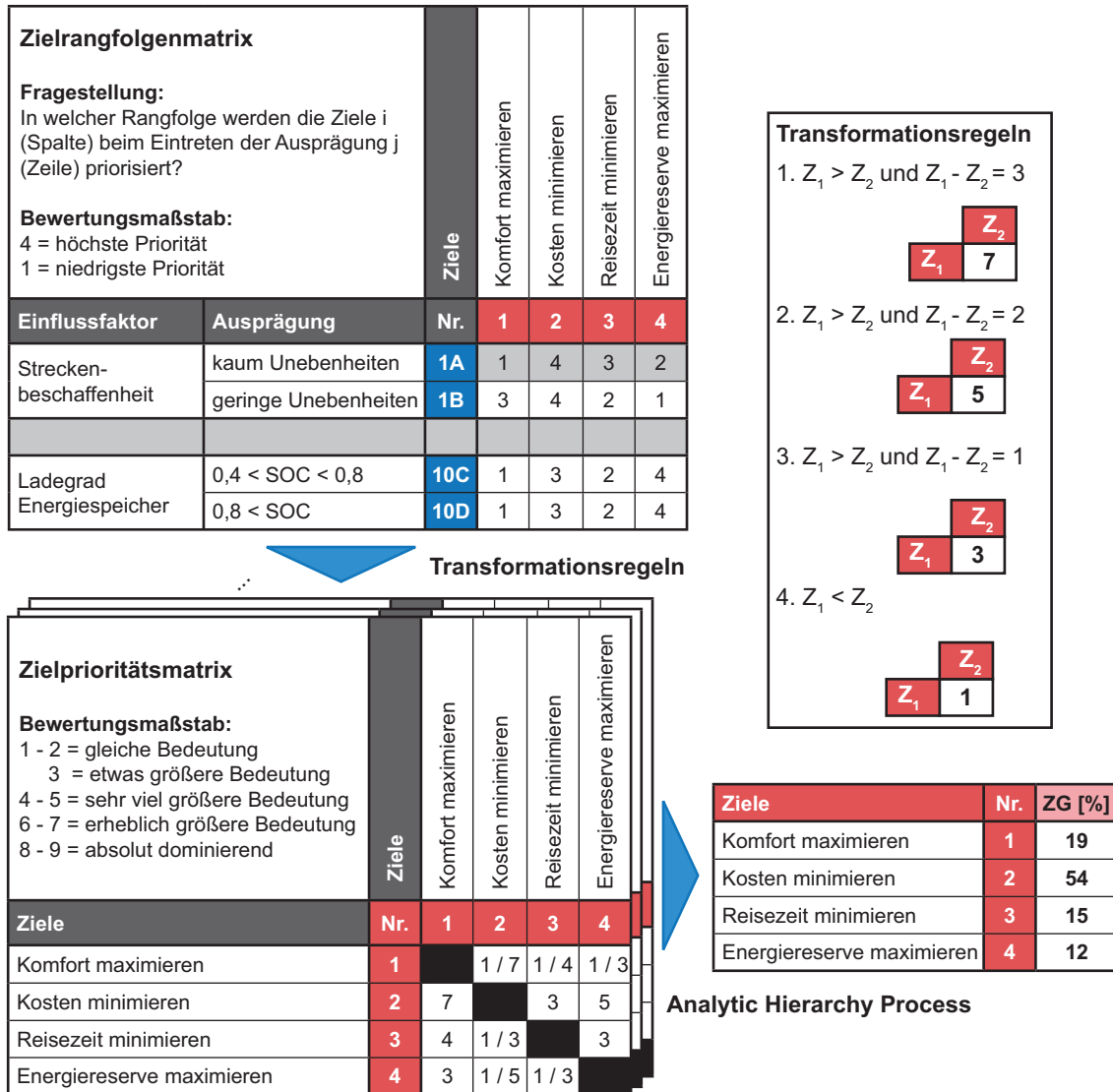


Bild 5-26: Vorgehen zur Bestimmung der Systemziele

### 5.5.2.3 Anpassung des Systemverhaltens

Auf Basis der Zielgewichtung wird zur Anpassung des Systemverhaltens ein geeigneter Betriebspunkt ausgewählt. Im realen Intelligenten Technischen System erfolgt die Auswahl des Betriebspunkts über Lookup-Tables, welche durch Simulation von dynamischen Modellen des Systems und mittels Mehrzieloptimierungsverfahren erstellt werden (vgl. Abschnitt 2.3.3). Da zu diesem Zeitpunkt lediglich die Prinzipiösung als Modell des Systems vorliegt, lassen sich die optimalen Betriebspunkte des Systems noch nicht durch Simulation ermitteln. Es wird daher eine vereinfachte Form der Lookup-Table gewählt.



## Modellerstellung

Die **Systemparametermatrix** (vgl. Bild 5-27) wird durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam auf Basis ihres Erfahrungswissens bewertet. Für jede Ausprägung  $j$  (Zeile) der Einflussfaktoren wird bewertet, welchen Parameterwert die Parameter  $i$  (Spalte) einnehmen. Die Bewertungsskala reicht von 0 (keinen Wert) bis 5 (höchsten Wert). Beispielsweise ist der *Energiebedarf des Hybriden Energiespeichersystems (HES)* (Spalte 6) sehr hoch, wenn sein Ladegrad (Zeile 10A) unter 20 Prozent sinkt.

## Simulation

Für jede Betriebssituation lässt sich über die Systemparametermatrix der gewünschte Betriebspunkt ermitteln. Hierzu wird für jede Ausprägung der Einflussfaktoren innerhalb der betrachteten Betriebssituation der geforderte Parameterwert für die Systemparameter bestimmt. Aus der resultierenden Menge der Parameterwerte je Systemparameter wird der höchste Wert ausgewählt. Die ausgewählten Parameterwerte legen den **Betriebspunkt** des Systems in der Situation fest.

Systemparametermatrix						
<b>Fragestellung:</b> Welchen Parameterwert nimmt der Systemparameter $i$ (Spalte) ein, wenn die Ausprägung $j$ (Zeile) in einer Betriebssituation auftritt?  <b>Bewertungsmaßstab:</b> 0 (kein Wert) bis 5 (höchster Wert)  <b>Bewertungsmaßstab:</b> ist abhängig vom Systemparameter		Parameter	Energiebedarf Feder-Neige-Modul	Energiebedarf Antriebsmodul	Energiebedarf HES	Energiebedarf Spurführungsmodul
		Nr.	1	2	3	4
Energiekosten aktuell	niedrig	5A	0	0	3	0
	mittel	5B	0	0	1	0
	hoch	5C	0	0	0	0
	sehr hoch	5D	0	0	0	0
Ladegrad Energiespeicher (SOC)	SOC < 0,2	10A	0	0	5	0
	0,2 < SOC < 0,4	10B	0	0	5	0
	0,4 < SOC < 0,8	10C	0	0	2	0
	0,8 < SOC	10D	0	0	1	0

Parameter	Energiebedarf Feder-Neige-Modul	Energiebedarf Antriebsmodul	Energiebedarf HES	Energiebedarf Spurführungsmodul
Nr.	1	2	3	4
1A	2	0	0	1
2C	0	0	2	0
3C	0	0	0	0
4B	0	0	2	0
5A	0	0	3	0
6A	0	0	0	0
7B	0	4	0	0
8A	0	0	0	0
9A	2	0	0	1
10C	0	0	2	0

Parameter	1	2	3	4
Betriebspunkt	2	4	3	1

Bild 5-27: Systemparametermatrix zur Ableitung des Betriebspunkts für die ausgewählte Betriebssituation Nr. 1 und einem Ladegrad von  $0,4 < SOC < 0,8$

Anhand des Betriebspunkts kann das Systemverhalten in der Situation abgebildet werden. Im Validierungsbeispiel sind der Ladegrad des Energiespeichers, der Energieverbrauch, die Kosten für die Energie sowie der erlebte Nutzen  $n_{i,s}$  für die Nutzelemente die im Systembetrieb veränderlichen Größen. Unter optimalen Bedingungen<sup>107</sup> kann der geforderte Betriebspunkt angefahren werden und die veränderlichen Größen werden wie in Abschnitt 5.5.1 definiert angepasst.

In der Realität sind die Bedingungen jedoch nicht immer optimal. Aus diesem Grund sind **Nebenbedingungen** durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam zu definieren und im Simulationsmodell abzubilden. Nebenbedingungen ergeben sich aus den Beschreibungen des Systemverhaltens aus den Anwendungsszenarien für den Betrieb (vgl. Abschnitt 5.1.5). Unter diesen Bedingungen erfolgt eine Anpassung des Betriebspunkts, wenn nur so ein lauffähiges System möglich ist oder eine Steigerung des erlebten Nutzens  $n_{i,s}$  bzw. eine Kostensenkung realisiert werden kann. Im Validierungsbeispiel wurden verschiedene Nebenbedingungen definiert. Bspw. wird das Hybride Energiespeichersystem nicht geladen, wenn es gleichzeitig Energie an das Bordnetz abgibt. Dies ist der Fall, wenn nicht ausreichend Energie über die Strecke verfügbar ist oder die aktuellen Energiekosten zu hoch, die Kosten für die Energie aus dem Speicher jedoch niedriger sind. Grundvoraussetzung hierfür ist, dass ausreichend Energiereserven vorhanden sind.

Übersteigt die geforderte Energie (vgl. Bild 5-28) die verfügbare Energie, ist ein Betriebspunkt zu wählen, bei dem das System weniger Energie benötigt. Diese Anpassung des Betriebspunkts kann nur durch eine Reduktion des Nutzens für den Kunden erfolgen. Es wird mit dem Systemparameter begonnen, welcher mit dem am niedrigsten priorisierten Ziel korrespondiert. In Bild 5-28 wird das Ziel *Reisedauer minimieren* am niedrigsten priorisiert und der Reisende fordert eine *mittlere* Reisedauer. Der aus der Reisedauer resultierende erwartete Nutzen ist  $e_{RD,R} = 3$ .

In der vorliegenden Situation, wird durch Verlängerung der Reisedauer (Ausprägung 7D: *längere*) der Systemparameter für den Energiebedarf reduziert. Unter der Nebenbedingung, dass kein äußerer Einfluss in der vorliegenden Situation einen höheren Systemwert für den Parameter fordert, wird der Betriebspunkt entsprechend angepasst. Der erlebte Nutzen, der durch die Verlängerung der Reisedauer für den Reisenden resultiert, beträgt  $n_{RD,R} = 2$ . Da das Ziel *Reisedauer minimieren* nur gering priorisiert wurde, halten sich die Auswirkungen auf die Kundenzufriedenheit in der Situation in Grenzen. Ist mehr Energie verfügbar als gefordert und entsprechen die *aktuellen Energiekosten* den Vorgaben der Reisenden für die *Fahrtkosten*, kann wie oben beschrieben vorgegangen werden. Einziger Unterschied: Der erlebte Nutzen für den Reisenden wird für die Vorgabe verbessert, welche die höchste Zielpriorität aufweist.

---

<sup>107</sup> In diesem Zusammenhang bedeuten optimale Bedingungen, dass bspw. ausreichend Energie für das System zur Verfügung steht, um den geforderten Betriebspunkt umzusetzen.

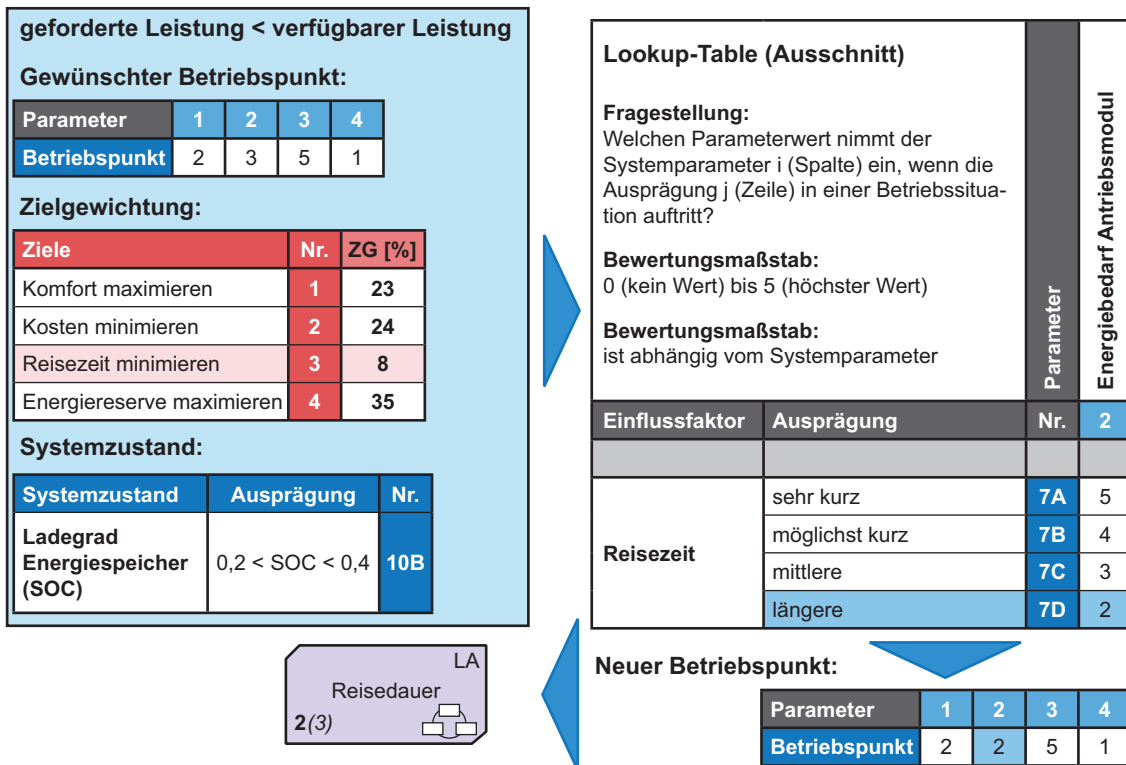


Bild 5-28: Anpassung des Betriebspunkts

Das Systemverhalten wird solange simuliert, bis sich die Betriebssituation nach der vorgegebenen Zeit (bspw.  $d = 3$ ) oder der Zustand des Systems ändert und somit eine Anpassung der Systemziele erforderlich wird. In diesem Fall wird der Selbstoptimierungsprozess erneut angestoßen. Wurde der Betriebsfall nach der vorgegebenen Zeit (z.B.  $t = 3$ ) simuliert, wird eine neue Simulation des Betriebsfalls mit einer neuen Betriebssituation als Startpunkt angestoßen. Wurden alle Betriebssituationen als Ausgangspunkt für den Betriebsfall simuliert, wird wie beschrieben für den nächsten Betriebsfall verfahren. Wurden alle Betriebsfälle simuliert, lassen sich die situationsabhängigen Elemente auf Basis der Ergebnisse bewerten.

### 5.5.3 Bewertung der situationsabhängigen Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell

Ergebnis der Simulation des Betriebs sind die situationsabhängigen Bewertungen der betrachteten Elemente des Wirtschaftlichkeitsmodells über die einzelnen Betriebssituationen und Betriebsfälle hinweg. Diese werden wie in Tabelle 5-5 aufgezeigt dokumentiert. Wie bereits für die Teilfunktionen kann auf Basis der Ergebnisse für jede Betriebssituation ein Nutzenbeitrag  $NB_i$  und ein Kostenbeitrag  $KB_i$  berechnet werden. Diese ergeben sich wie in Gleichung 5-18 dargestellt.

$$NB_i = \frac{\sum_{j=1}^J n_{i,j}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J n_{i,j}} \times 100$$

$$KB_i = \frac{\sum_{j=1}^J k_{i,j}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J k_{i,j}} \times 100$$

Gleichung 5-18: Berechnung des Nutzenbeitrags  $NB_i$  und des Kostenbeitrags  $KB_i$  je Betriebssituation

Wie bereits für die Teilfunktionen in Abschnitt 5.3.3 lässt sich mittels der Nutzen- und Kostenbeiträge eine Zielkostenkontrolle im Zielkostenkontrolldiagramm für jede Betriebssituation durchführen (vgl. Abschnitt 5.3.3, Bild 5-18). Über den erwarteten Nutzen  $e_i$  und den erlebten Nutzen  $n_i$  kann wie in Abschnitt 5.3.5 der Kundenzufriedenheitsbeitrag je Nutzenelement berechnet werden.

Tabelle 5-5: Simulationsergebnisse des dynamischen Verhaltens im Betrieb (Ausschnitt)

Ergebnisse der Simulation des dynamischen Verhaltens im Betrieb																		
Betriebsfall (BF)	Simulations-Nr.	Dauer BF t	Betriebssituation Nr.	Dauer BS d	Komfort max. ZG <sub>1</sub>	Kosten min. ZG <sub>2</sub>	Reisezeit min. ZG <sub>3</sub>	Energiereserve max. ZG <sub>4</sub>	Komfort e <sub>i</sub>	Komfort n <sub>i</sub>	Reisedauer e <sub>i</sub>	Reisedauer n <sub>i</sub>	Energieverbrauch e <sub>i</sub>	Energieverbrauch n <sub>i</sub>	Nutzenbeitrag NB <sub>i</sub>	Fahrtkosten k <sub>i</sub>	Energiekosten k <sub>i</sub>	Kostenbeitrag KB <sub>i</sub>
Kurzstrecke Nahverkehr	1	3	1	3	19	54	15	12	2	2	4	4	3	2	0,7	2	2	0,7
	2	3	2	3	23	24	8	35	2	2	4	3	3	3	0,7	3	3	1
	3	3	3	3	46	18	24	12	2	3	4	4	3	3	0,9	2	2	0,8
Mittelstrecke Fernverkehr	104	25	96	10	13	48	9	30	3	3	3	3	3	3	0,8	2	2	0,8
			83	8	64	10	18	8	3	4	3	2	3	4	0,9	3	2	0,9
			79	7	58	21	5	16	5	5	2	2	3	3	0,9	2	2	0,8
Summe (Σ e <sub>k,i</sub> , Σ n <sub>k,i</sub> , Σ e <sub>RD,i</sub> , Σ n <sub>RD,i</sub> , Σ k <sub>F,i</sub> , Σ k <sub>E,i</sub> )									386	401	412	421	300	328	100	275	254	100
Nutzwert (e <sub>i</sub> , n <sub>i</sub> ), Kostenwert (k <sub>i</sub> )									3	4	3	4	3	4		3	2	

Abschließend wird der erwartete Nutzwert  $e_j$ , der erlebte Nutzwert  $n_j$  sowie der Kostenwert  $k_j$  für die situationsabhängigen Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell, wie in Gleichung 5-19 dargestellt, berechnet.

$$e_j = EW_i * \sum_{BF=1}^b \frac{\sum_{i=1}^l (e_{i,BF} * d)}{\sum_{i=1}^l d}$$

$$n_j = EW_i * \sum_{BF=1}^b \frac{\sum_{i=1}^l (n_{i,BF} * d)}{\sum_{i=1}^l d}$$

$$k_j = EW_i * \sum_{BF=1}^b \frac{\sum_{i=1}^l (k_{i,BF} * d)}{\sum_{i=1}^l d}$$

*Gleichung 5-19: Berechnung der Werte für die situationsabhängigen Elemente*

## 5.6 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

In der abschließenden Phase wird die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Prinziplösung für das zu entwickelnde Intelligente Technische System analysiert. Hierzu wird das Wirtschaftlichkeitsmodell zunächst auf seine Plausibilität geprüft (vgl. Abschnitt 5.6.1), die Wirtschaftlichkeit abschließend überprüft (vgl. Abschnitt 5.6.2) und die Zielkosten für die weitere Entwicklung festgelegt (vgl. Abschnitt 5.6.3).

### 5.6.1 Prüfung der Plausibilität des Wirtschaftlichkeitsmodells

Zur Erstellung des Wirtschaftlichkeitsmodells wurden in Abschnitt 4.1.4 Richtlinien und Bedingungen definiert, mit denen die Modellierer bei der Erstellung eines plausiblen Wirtschaftlichkeitsmodells unterstützt werden. Im ersten Schritt der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird das erstellte Wirtschaftlichkeitsmodell in Anlehnung an KAISER auf seine Plausibilität geprüft [Kai14, S. 101ff.]. Mit Hilfe einer Checkliste<sup>108</sup> erfolgt die systematische Überprüfung der Einhaltung der Richtlinien und Bedingungen. Sie gliedert sich in die drei Bereiche Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Richtigkeit. Tabelle 5-6 zeigt einen Ausschnitt aus der Checkliste.

Die Fragen der Checkliste sind vom interdisziplinären Entwicklungsteam mit *Ja* oder *Nein* zu beantworten. Die Antworten zeigen auf, ob die Richtlinien und Bedingungen im Wirtschaftlichkeitsmodell entsprechend umgesetzt wurden. Wurde eine Frage mit *Nein* beantwortet ist entsprechend der Entwicklungsaufgabe zu prüfen, ob eine Nichterfüllung im vorliegenden Fall zu rechtfertigen ist. Die vollständige Checkliste findet sich in Anhang A4. Für das im Validierungsbeispiel erstellte Wirtschaftlichkeitsmodell wurde mit Hilfe der Checkliste die Plausibilität geprüft und bestätigt.

---

<sup>108</sup> Checklisten sind Organisationshilfen, welche die systematische Verfolgung und Kontrolle der Zielerreichung unterstützen. Sie fördern die intuitive Anregung und vermeiden das wichtige Punkte vergessen werden [Lin05, S. 229].

Tabelle 5-6: Checkliste zur Plausibilitätsprüfung (Ausschnitt)

Nr.	Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells	Ja /Nein
<b>1</b>	<b>Vergleichbarkeit</b>	
1.1	Ist jedes Kosten- und Nutzenelement einer Klasse zugeordnet?	
1.2	Sind alle Kostenelemente deren Entstehung von einer Funktion des Intelligenten Technischen Systems abhängen als «funktionsabhängig» klassifiziert?	
<b>2</b>	<b>Vollständigkeit</b>	
2.1	Wurden alle Elemente benannt?	
2.2	Wurden alle Beziehungen benannt?	
<b>3</b>	<b>Richtigkeit</b>	
3.1	Sind jedem Kostenelement kein oder mindestens zwei Elemente durch eine Aggregationsbeziehung zugewiesen?	
3.14	Zeigt die Raute der verstärkenden oder dämpfenden Beziehung eines Multiplikators auf das Element, welches vom Multiplikator beeinflusst wird?	

### 5.6.2 Überprüfung der Wirtschaftlichkeit

In dieser Phase erfolgt die abschließende Überprüfung der Wirtschaftlichkeit. Hierbei gilt es zu überprüfen, ob die vorliegende Prinzipzlösung den Ansprüchen der Stakeholder hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit genügt. Die Überprüfung erfolgt in mehreren Schritten, welche im Folgenden beschrieben werden (vgl. Bild 5-29).

Im ersten Schritt werden die **Kostenelemente** des Wirtschaftlichkeitsmodells mit Hilfe des Zielkostenkontrolldiagramms (vgl. Abschnitt 5.3.3) überprüft. Im nächsten Schritt wird für jedes **Nutzelement** überprüft, ob der erlebte Nutzwert  $n_{i,s}$  der vorliegenden Lösung dem erwarteten Nutzwert  $e_{i,s}$  entspricht, oder diesen sogar übersteigt. Erfüllt die vorliegende Prinzipzlösung die Nutzenanforderungen der Stakeholder, wird im nächsten Schritt überprüft, ob für alle **Wirtschaftlichkeitselemente** des Modells  $w_{i,s} \geq 1$  gilt und somit die gefundene Lösung für alle betrachteten Stakeholder wirtschaftlich ist.

Abschließend werden die **Multiplikatoren** und ihre Auswirkung auf die Elemente des Wirtschaftlichkeitsmodells überprüft. Hierzu werden die Werte der Multiplikatoren, wie bspw. die *Auslastung*, variiert und die resultierenden Veränderungen im Modell bewertet. Auf diese Weise lässt sich bspw. identifizieren, dass bei einer Auslastung von über 80 Prozent das System noch für die Neue Bahntechnik Paderborn AG wirtschaftlich ist. Sind die Resultate der Überprüfung der Wirtschaftlichkeit für das interdisziplinäre Entwicklungsteam zufriedenstellend, wird im letzten Schritt der Zielkostenrahmen für die weitere Entwicklung festgelegt.

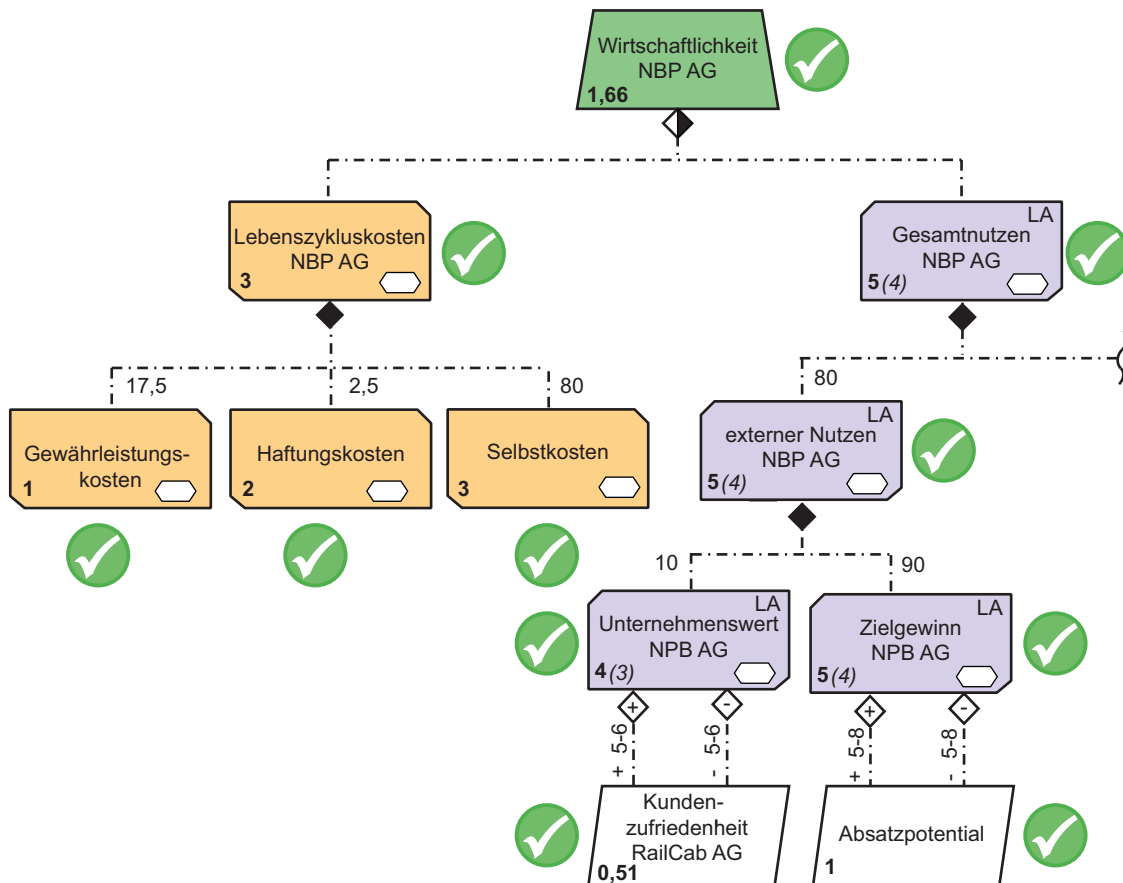


Bild 5-29: Überprüfung der Wirtschaftlichkeit (Ausschnitt)

### 5.6.3 Ermittlung der Zielkosten für die weitere Entwicklung

Das überprüfte Wirtschaftlichkeitsmodell gibt die Gewichtung der betrachteten Kostenelemente im Lebenszyklus des zu entwickelnden Intelligenen Technischen Systems für die unteren Aggregationsebenen vor. Auf dieser Basis lassen sich im Sinne des Target Costings (vgl. Abschnitt 3.3.1) die Zielkosten für die weitere Entwicklung des Systems für die einzelnen Elemente ermitteln (vgl. Gleichung 5-20). Hierzu weist das interdisziplinäre Entwicklungsteam den Kostenelementen die Zielkosten  $ZK_i$  gemäß ihrer Gewichtung  $GF_i$  anteilig zu (vgl. Tabelle 5-7).

$$ZK_i = ZK_j * GF_i$$

Gleichung 5-20: Berechnung Zielkosten  $ZK_i$

Ergebnis der Phase ist ein plausibles Wirtschaftlichkeitsmodell für eine wirtschaftliche technische Lösung sowie ein Zielkostenrahmen für die weitere Entwicklung des Intelligenen Technischen Systems. Die im Rahmen der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung angestoßenen Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit sollten integraler Bestandteil des gesamten Entwicklungsprozesses sein. Im Rahmen des disziplinspezifischen Entwurfs und Ausarbeitung gilt es, die getroffenen Überlegungen kontinuierlich kritisch zu

überprüfen und zu bewerten, um das zu entwickelnde System hinsichtlich niedriger Lebenszykluskosten und der Steigerung des Nutzens zu verbessern. Das Resultat der Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme gibt hierfür den notwendigen Entwicklungsrahmen vor.

*Tabelle 5-7: Ermittlung der Zielkosten (Ausschnitt)*

Zielkostenrahmen für die Entwicklung des RailCabs				
Kostenelement	GF <sub>j</sub> [%]	Zielkosten ZK <sub>j</sub> [€]	GF <sub>i</sub> [%]	Zielkosten ZK <sub>i</sub> [€]
<b>Lebenszykluskosten pro RailCab</b> (25 Jahre Nutzungsdauer)	<b>100</b>	<b>560.000</b>		
<b>Zielpreis RailCab / Anschaffungskosten</b>	100	359.520	<b>64,2</b>	<b>359.520</b>
<i>Zielgewinn</i>			10	35.952
<b>Selbstkosten RailCab</b>	100	323.568	90	323.568
<b>Vertriebskosten</b>			3	9.707,04
<b>Sonstige Kosten</b>			5	16.178,4
<b>Funktionskosten</b>	100	297.682,56	92	297.682,56
<b>Entwicklungskosten</b>	100	122.049,85	41	122.049,85
Teilfunktion-Lösungselement-Komination1			0,34	414,97
<b>Investitionskosten</b>	100	38.698,73	13	38.698,73
Teilfunktion-Lösungselement-Komination1			0,11	42,57
<b>Herstellkosten</b>	100	136.933,98	46	136.933,98
Teilfunktion-Lösungselement-Komination1			0,39	534,04
<b>Instandhaltungskosten</b>	100	32.480	<b>5,8</b>	<b>32.480</b>
Wartungskosten			23	7470,4



## 5.7 Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen

In diesem Abschnitt wird die entwickelte Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme anhand der in Abschnitt 2.7 aufgestellten Anforderungen bewertet.

### A1: Integraler Bestandteil der Konzipierung

Die entwickelte Systematik ist integraler Bestandteil des Konzipierungsprozesses für Intelligente Technische Systeme. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Systematik ist der Entwicklungsauftrag, welcher die Zielkosten vorgibt. In der Phase *Planen und Klären der Aufgabe* werden relevante Stakeholder für die Entwicklungsaufgabe ausgewählt und Nutzenpotentiale für diese identifiziert. Es wird ein Leitfaden zur Definition von Anwendungsszenarien bereitgestellt, welcher bei der Übersetzung der Nutzenpotentiale in technische Anforderungen unterstützt. Auf Basis der Anforderungen werden in den Phasen *Konzipierung des Gesamt- und Subsystems* Lösungsvarianten entwickelt. Die Bewertung und Auswahl Erfolg versprechender Lösungsvarianten wird durch die Systematik mittels Methoden zur Bewertung der Anforderungserfüllung sowie Zielkostenkontrolle unterstützt. In der abschließenden Phase des Konzipierungsprozesses wird die Analyse und Bewertung der Wirtschaftlichkeit für die ausgewählte Prinzipiellösung mit Hilfe des Wirtschaftlichkeitsmodells ermöglicht. Hierbei wird zudem Verbesserungspotential für die Prinzipiellösung aufgezeigt. Durch das generische Vorgehen ist die allgemeingültige Anwendbarkeit der Systematik im Rahmen der Konzipierung sichergestellt.

### A2: Entscheidungsgrundlage

Das entwickelte Wirtschaftlichkeitsmodell zeigt die Kosten und den Nutzen auf, welche durch die entwickelte Lösung über dessen Lebenszyklus für die relevanten Stakeholder entstehen. Zudem werden die Kosten und der Nutzen gegenübergestellt und so eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Lösung getroffen. Das plausible und vollständig bewertete Wirtschaftlichkeitsmodell bietet somit eine Entscheidungsgrundlage für die Weiterentwicklung der vorliegenden prinzipiellen Lösung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

### A3: Rahmen für die wirtschaftliche, disziplinspezifische Entwicklung

Die entwickelte Systematik liefert Methoden und Vorgehensweisen, mit denen der Anteil einzelner Elemente des Systems an den Lebenszykluskosten ermittelt werden können. Dieser Kostenanteil wird im Sinne des Target Costings dem Nutzenanteil der Elemente gegenübergestellt. Auf diese Weise kann überprüft werden, ob eine wirtschaftliche Lösung gefunden wurde. Ist dies der Fall, werden zum Abschluss der Konzipierung auf Basis der Gewichtungsfaktoren im Wirtschaftlichkeitsmodell die zulässigen Kosten für die disziplinspezifische Entwicklung berechnet. Auf diese Weise liefert die Systematik einen Rahmen für die nachfolgende wirtschaftliche Entwicklung.

**A4: Einheitliches Verständnis der Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit des Systems wird in der entwickelten Systematik durch ein Wirtschaftlichkeitsmodell abgebildet, welches von allen beteiligten Disziplinen gleichermaßen gelesen und verstanden werden kann. Es bildet die Grundlage für ein einheitliches Verständnis der Wirtschaftlichkeit. Es handelt sich um ein konzeptuelles Modell, welches zwischen Kosten-, Nutzen-, Wirtschaftlichkeits- und Stakeholderelementen sowie Multiplikatoren unterscheidet. Stehen Elemente miteinander in Interaktion, wird dies durch eine Beziehung zwischen den Elementen dargestellt. Die Systematik definiert eine graphische Notation, die Semantik sowie die konkrete und abstrakte Syntax für das Modell.

**A5: Plausibilität**

Die Modellierung eines plausiblen Wirtschaftlichkeitsmodells wird durch Richtlinien und Bedingungen im Rahmen der entwickelten Systematik unterstützt. Sie leiten das interdisziplinäre Entwicklungsteam bei der einheitlichen Auswahl der Modellkonstrukte sowie bei der vergleichbaren Modellierung an. Um die Vollständigkeit des Wirtschaftlichkeitsmodells sicherzustellen, wird eine Grundstruktur für Kosten und Nutzen über den Lebenszyklus bereitgestellt. Diese ist systemspezifisch auszuprägen. Hierbei unterstützt die Systematik bei der Identifikation der relevanten Kosten- und Nutzelemente. Die Bedingungen an die Beziehungen zwischen den Elementen ermöglichen die Überprüfung der Richtigkeit des Modells. Abschließend erfolgt die Überprüfung der Plausibilität des Modells mit Hilfe einer Checkliste.

**A6: Lebenszykluskostenanalyse**

Die Identifikation der Kosten im Lebenszyklus des betrachteten Intelligenten Technischen Systems unterstützt die Systematik zum einen durch die Analyse des Systemumfelds. Zum anderen wird ein Leitfaden zur Definition von Anwendungsszenarien bereitgestellt, welcher die systematische Identifikation der Lebenszykluskosten in einzelnen Situationen ermöglicht. Die Analyse und Bewertung der Lebenszykluskosten für die prinzipielle Lösung wird über den gesamten Konzipierungsprozess durch die Systematik mit geeigneten Methoden unterstützt. Bspw. wurde eine Fehlermöglichkeits-, Einfluss- und Fehlerkostenanalyse (FMEFA) entwickelt, welche Kosten- und Nutzelemente bewertet, die von der Verlässlichkeit des Systems abhängen. Die Kostenelemente und ihre Struktur werden im Wirtschaftlichkeitsmodell abgebildet.

**A7: Kundenorientierte Analyse**

Die kundenorientierte Analyse des Systems wird in der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung kontinuierlich unterstützt. Die Identifikation von Nutzenpotentialen und der daraus resultierende Nutzen wird im Rahmen der Phase Planen und Klären der Aufgabe methodisch unterstützt. Die Nutzelemente werden gemäß der Grundstruktur des Nutzens über den Lebenszyklus im Wirtschaftlichkeitsmodell abgebildet. Für jedes Nutzelement wird mittels des Kano-Kategorisierungsportfolios eine Kano-Kategorie zuge-

wiesen. Die Systematik stellt zudem verschiedene Bewertungsmethoden für den erwarteten und erlebten Nutzen der Stakeholder für ein Nutzelement bereit. Auf Basis der Nutzenbewertung und der Kano-Kategorie lässt sich die Kundenzufriedenheit berechnen, welche als Multiplikator die Abhängigkeiten des Nutzens der Stakeholder aufeinander abbilden.

#### **A8: Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Elemente**

Im Wirtschaftlichkeitsmodell werden die Abhängigkeiten der Kosten, des Nutzens sowie der Wirtschaftlichkeit über Aggregations-, Verhältnis sowie dämpfende und verstärkende Beziehungen abgebildet. Zudem werden Multiplikatoren und ihr Einfluss auf die anderen Elemente des Modells abgebildet. Ein Beispiel hierfür ist die Kundenzufriedenheit.

#### **A9: Berücksichtigung des Systemverhaltens**

Die Bewertung der Kosten- und Nutzelemente, welche vom Verhalten des Intelligenten Technischen Systems im Betrieb abhängen, werden durch das im Rahmen der Arbeit entwickelte Vorgehen zur frühzeitigen Analyse der Systemdynamik und zur Bewertung der situationsabhängigen Elemente im Wirtschaftlichkeitsmodell unterstützt.

Die entwickelte Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme erfüllt somit die gestellten Anforderungen.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Innovationen stärken die internationale Wettbewerbsfähigkeit. Wie **Kapitel 1** zeigt, beruhen über 80 Prozent der Innovationen in Deutschland auf der Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik. In Kombination mit nicht-technischen Disziplinen, wie der Kognitionswissenschaft oder Neurobiologie, werden sogenannte Intelligente Technische Systeme ermöglicht. Diese Systeme sind in der Lage, intelligent und flexibel auf veränderte Umgebungsbedingungen zu reagieren. Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich. Durch diese Eigenschaften kann das Kosten/Nutzen-Verhältnis und somit die Wirtschaftlichkeit bestehender Systeme erheblich verbessert werden. Diese Nutzenpotentiale gilt es, entsprechend der Bedürfnisse der Kunden in einem vorgegebenen Kostenrahmen zu realisieren. Die Prinzipiellösung des zu entwickelnden Systems legt neben den technischen Eigenschaften, bereits bis zu 60 Prozent der Kosten sowie den Nutzen für die Stakeholder über den Lebenszyklus fest. Es mangelt jedoch bei den Entwicklern an einem einheitlichen Verständnis für die Entstehung von Kosten und Nutzen und somit der Wirtschaftlichkeit des Systems über den Lebenszyklus. Dieses Verständnis gilt es, bereits in der Konzipierung zu schaffen, mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Lösungsalternative, welche am Markt erfolgreich sein wird. Hierzu bedarf es jedoch eines strukturierten Vorgehens sowie eines Wirtschaftlichkeitsmodells.

Die vielfältigen Herausforderungen bei der wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme werden in **Kapitel 2** herausgearbeitet. Ihr Konzipierungsprozess sowie ihre Entwicklung sind durch eine hohe Interdisziplinarität geprägt. Aus diesem Grund erfolgt die Entwicklung zunehmend modellbasiert. Es gilt, ein ganzheitliches Systemverständnis zu erzeugen, welches sich nicht nur auf das technische System bezieht, sondern auch die Entstehung von Kosten und Nutzen sowie ihre Abhängigkeiten über dessen Lebenszyklus umfasst. Ein entsprechendes Wirtschaftlichkeitsmodell ist so aufzubauen, dass es von allen an der Entwicklung Beteiligten gleichermaßen verstanden werden kann. Im Allgemeinen besteht die Produktentwicklung aus einem Problemlösungszyklus, welcher in allen Phasen kontinuierlich durchgeführt wird. Er umfasst die drei Phasen: Synthese, Analyse und Auswahl. Um die Entwicklung wirtschaftlicher Lösungsvarianten zu ermöglichen, sind diese drei Phasen über den gesamten Konzipierungsprozess methodisch zu unterstützen. Hierzu bedarf es Methoden, welche die Analyse und Bewertung der Wirtschaftlichkeit Intelligenter Technischer Systeme auf Basis der Prinzipiellösung unter Berücksichtigung ihrer besonderen Eigenschaften ermöglichen. Zur Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsalternative bedarf es einer Entscheidungsgrundlage für das Management. Zudem sollte das Resultat der Konzipierung neben den technischen Rahmenbedingungen auch einen Rahmen für die wirtschaftliche, fachdisziplinspezifische Entwicklung liefern. Die Analyse des Stands der Technik in **Kapitel 3** zeigt, dass keiner der diskutierten Ansätze alle Anforderungen erfüllt. Ausgewählte Ansätze können jedoch unterstützend eingesetzt werden.

Vor diesem Hintergrund wurde in **Kapitel 4** ein Überblick über die Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme gegeben. Die Systematik umfasst ein konzeptuelles Modell, welches den Aspekt der Wirtschaftlichkeit abbildet sowie ein Vorgehen zur Entwicklung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Konzipierung. Im Modell wird zwischen Kosten-, Nutzen-, Wirtschaftlichkeits- und Stakeholderelementen sowie Multiplikatoren unterschieden. Stehen Elemente miteinander in Interaktion, wird dies durch eine Beziehung zwischen den Elementen dargestellt. Zur Darstellung der Modellkonstrukte wird eine graphische Notation bereitgestellt, welche die Spezifikationstechnik CONSENS ergänzen. Neben einer Grundstruktur von Kosten und Nutzen, welche über den Lebenszyklus für Intelligente Technische Systeme resultieren können, wird das interdisziplinäre Entwicklungsteam bei der Erstellung eines plausiblen Wirtschaftlichkeitsmodells angeleitet. Hierzu werden Richtlinien und Bedingungen für die Modellierung sowie eine Checkliste zur Überprüfung ihrer Einhaltung bereitgestellt. Das systematische Vorgehen gliedert sich in sechs Phasen, welche integraler Bestandteil der disziplinübergreifenden Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme sind.

In **Kapitel 5** werden die sechs Phasen der Systematik zum besseren Verständnis und zur Validierung des Vorgehens am Projekt „Neue Bahntechnik Paderborn“ dargestellt. In der ersten Phase werden Kosten- und Nutzenelemente sowie die relevanten Stakeholder für das Wirtschaftlichkeitsmodell identifiziert. Ausgangspunkt hierfür ist der Entwicklungsauftrag. Die identifizierten Elemente werden in der zweiten Phase in die Grundstruktur der Kosten und des Nutzens über den Lebenszyklus eingeordnet und den ausgewählten Stakeholder zugewiesen. Bei der Erstellung des plausiblen Wirtschaftlichkeitsmodells werden die Entwickler durch die Richtlinien und Bedingungen zur Modellierung unterstützt. Die Nutzenelemente werden im nächsten Schritt gewichtet und einer Kano-Kategorie zugewiesen. Abschließend werden die Multiplikatoren im Modell ergänzt und ihre Abhängigkeiten zu den Elementen beschrieben. Abschließend wird der erwartete Nutzen bewertet. Ergebnis der Phase ist das initiale Wirtschaftlichkeitsmodell, welches den Ausgangspunkt für die Bewertung und Auswahl der wirtschaftlichsten Lösungsvariante in Phase drei bildet. Diese erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren und umfasst die Überprüfung der Anforderungserfüllung, eine Zielkostenkontrolle sowie die Bewertung der funktions- und gesamtsystemabhängigen Elemente des Wirtschaftlichkeitsmodells. Auf Basis des initial bewerteten Wirtschaftlichkeitsmodells kann eine Lösungsvariante ausgewählt werden. Für diese wird mittels der Fehlermöglichkeits-, Einfluss- und Fehlerkostenanalyse (FMEFA) mögliche Ausfälle identifiziert sowie diese hinsichtlich Risiko und Kosten bewertet. Für diese werden geeignete Gegenmaßnahmen für jeden Ausfall identifiziert und die verbesserte Prinzipiellösung erneut durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam in der FMEFA bewertet. Da sich der Nutzen Intelligenter Technischer Systeme insbesondere im Systembetrieb auf Basis des Verhaltens zeigt, wird dieses simuliert. Hierzu werden die relevanten Aspekte des Systems identifiziert und das Simulationsmodell erstellt. Die Betriebsfälle werden simuliert und die situationsabhängigen Elemente

auf Basis der Simulationsergebnisse bewertet. In der letzten Phase erfolgt eine Plausibilitätsprüfung des entwickelten Wirtschaftlichkeitsmodells anhand einer Checkliste. Abschließende wird die Wirtschaftlichkeit der Prinzipiellösung überprüft. Ist eine zufriedenstellende Lösung gefunden, werden den einzelnen Kostenelementen Zielkosten zugewiesen. Ergebnis der Phase ist das plausible Wirtschaftlichkeitsmodell sowie ein Zielkostenrahmen für die weitere Entwicklung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Systematik alle an sie gestellten Anforderungen erfüllt und ein einheitliches Verständnis der Wirtschaftlichkeit eines Intelligen Technischen Systems für ein interdisziplinäres Entwicklungsteam schafft.

Für eine wirtschaftlichkeitsorientierte Entwicklung Intelligenter Technischer Systeme besteht **zukünftiger Forschungsbedarf**. Die vorgestellte Systematik ermöglicht die Analyse, Bewertung und Abbildung der Wirtschaftlichkeit der Prinzipiellösung für das Intelligente Technische System im Rahmen der Konzipierung. Jedoch bedingen sich Produkt und Produktionssystem, wie der Produktentstehungsprozess nach GAUSEMEIER zeigt [GP14, S. 26]. *Kurzfristig* ist daher eine Erweiterung der Systematik auf das zugehörige Produktionssystem Erfolg versprechend. Um die Einhaltung der wirtschaftlichen Vorgaben im disziplinspezifischen Entwurf und Ausarbeitung zu gewährleisten, ist der Einsatz des Wirtschaftlichkeitsmodells in dieser Phase *mittelfristig* zu prüfen. Die vorliegende Systematik liefert hierfür den Ausgangspunkt. Zur Detaillierung scheint die Integration von disziplinspezifischen Kostenschätzverfahren (vgl. [Zir10, S. 54ff.]) sowie der Ausbau der Kundenorientierung im Rahmen der Entwicklung bspw. durch den Einsatz des Marktlabs aus dem Spitzencluster it's OWL sinnvoll [BJ12-ol, S. 5ff.], [Bun14, S. 128f.]. Mittels eines Prämissen-Controllings lässt sich darüber hinaus die Frage klären, ob die dem Modell zugrunde liegenden Annahmen weiterhin Bestand haben. Im Idealfall könnte die Systematik und ihre Weiterentwicklung für die weitere Produktentwicklung in das Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme nach KAHL integriert werden [Kah13, S. 97ff.]. Somit kann die Entwicklung automatisiert so angepasst werden, dass die Wirtschaftlichkeit des Systems kontinuierlich sichergestellt wird. *Langfristig* erscheint eine durchgängige Softwareunterstützung der Systematik sinnvoll. Die Abbildung des Wirtschaftlichkeitsmodells in Anlehnung an die Prinzipiellösung bspw. im Mechatronic Modeller [GLL12, S. 107ff.] oder im SysML-Profil von CONSENS im Enterprise Architect [IKD+13, S. 341ff.] kann die Entwickler zusätzlich unterstützen. Darüber hinaus sind die einzelnen Bewertungsschritte softwaretechnisch zu unterstützen. Zudem bietet sich für Folgeprojekte eine Datenbank an, in welcher die Kosten- und Nutzenergebnisse vorheriger Entwicklungsprojekte als Erfahrungswissen abgelegt werden. Hierzu ist die Erweiterung der Lösungsmuster um den Aspekt Wirtschaftlichkeit in der Lösungsmusterdatenbank nach DUMITRESCU zu prüfen [Dum11, S. 156ff.]. Auf dieser Basis lässt sich bereits in der Konzipierung eine detaillierte Aussage über die Wirtschaftlichkeit des zu entwickelnden Systems ermöglichen.





## 7 Abkürzungsverzeichnis

A	Anforderung
$A_{RC}$	Auslastung des RailCabs für die Betreibergesellschaft RailCab AG
AG	Aktiengesellschaft
AHP	Analytic Hierachy Process
AIAG	Automotive Industry Action Group
AMS	Autonome Mechatronische Systeme
$AP_{NBP}$	Absatzpotential für das RailCab für den Hersteller Neue Bahntechnik Paderborn AG
$as_i$	Auswirkung des Ausfalls $i$
$aw_i$	Auftretenswahrscheinlichkeit des Ausfalls $i$
BA	Basisattribut
BEA	Begeisterungsattribut
BF	Betriebsfall
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-aided Design
CBS	Cost Breakdown Structure
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
$e_{G,S}$	Erwarteter Nutzen für das Nutzelement Zielgewinn $G$ und den Stakeholder $S$
$e_{i,S}$	erwarteter Nutzen je Nutzelement $i$ für den Stakeholder $S$
EAK	erwartete Ausfallkosten
Ed.	Editor

---

engl.	englisch
et al.	et alii
etc.	et cetera
$ew_i$	Entdeckungswahrscheinlichkeit für den Ausfall $i$
$EW_i$	Eintrittswahrscheinlichkeit des Betriebsfalls $i$
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FK	funktionsabhängige Kostenelemente
$FKB_{i,S}$	Funktionskostenbeitrag je Funktion $i$ für den Stakeholder S
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FMECA	Fehlerzustands-, auswirkungs-, und -kritizitätsanalyse
FMEFA	Fehlermöglichkeits-, Einfluss- und Fehlerkostenanalyse
$FNB_{i,S}$	Funktionsnutzenbeitrag je Funktion $i$ für den Stakeholder S
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTA	Fault Tree Analysis
$g_i$	Gewichtungssumme je Nutzelement $i$
$GF_i$	Gewichtungsfaktor je Element $i$
ggf.	Gegebenenfalls
$g_k$	Knotengewicht
$g_s$	Stufengewicht
Hrsg.	Herausgeber
$i$	Zählvariable
IHK	Instandhaltungskosten
INCOSE	International Council on Systems Engineering
it's OWL	BMBF-Spitzencluster Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe
$j$	Zählvariable
K	Kano-Kategorie
$k_{FK}$	Kosten für funktionsabhängige Kostenelemente $FK$

---

$k_{i, EAK}$	erwartete Ausfallkosten für den Ausfall $i$
$k_{i, GK}$	Gewährleistungskosten für den Ausfall $i$
$k_{i, HFK}$	Haftungskosten für den Ausfall $i$
$k_{i, IHK}$	Instandhaltungskosten für den Ausfall $i$
$k_{i, ISK}$	Instandsetzungskosten für den Ausfall $i$
$k_{i, MK}$	Materialkosten für den Ausfall $i$
$k_{i, OK}$	Opportunitätskosten für den Ausfall $i$
$k_{i, S}$	Kostenwert für das Kostenelement $i$ des Stakeholder $S$
$k_{i, WK}$	Wartungskosten für den Ausfall $i$
$KB_i$	Kostenbeitrag der Betriebssituation $i$
LA	Leistungsattribut
max.	Maximum
MDS	Multidimensionale Skalierung
MFM	Mechatronische Funktionsmodule
MID	Molded Interconnected Devices
$n_{ON, S}$	erlebter Nutzwert für das Nutzelement <i>objektiver Nutzen</i>
$n_{i, S}$	erlebter Nutzen je Nutzelement $i$ für den Stakeholder $S$
$NB_i$	Nutzenbeitrag der Betriebssituation $i$
NBP AG	Neue Bahntechnik AG
No.	Number
Nr.	Nummer
OCM	Operator-Controller-Module
OMG	Object Management Group
p.	Page
pp.	Pages
QFD	Quality Function Deployment
$r_i$	Risikowert für den Ausfall $i$
RC AG	RailCab AG

RoI	Return on Investment
RPN	Risikoprioritätszahl (Risk Priority Number)
S	Stakeholder
S.	Seite
SFB 614	Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende System des Maschinenbaus“ der Universität Paderborn
SOC	State of Charge
sog.	sogenannt
SysML	Systems Modeling Language
T	Trend
u.a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VMS	Vernetzte Mechatronische Systeme
$w_{i,S}$	Wert des Wirtschaftlichkeitselements $i$ für den Stakeholder $S$
$x_{i,S}$	Erwartungserfüllung je Nutzelement $i$ für den Stakeholder $S$
Z	Ziel
$Z_{S,K}$	Summe des Zufriedenheitsbeitrags je Stakeholder $S$ in der Kano-Kategorie $K$
$Z_S$	Kundenzufriedenheit der Stakeholder $S$
$z_{i,K,S}$	Zufriedenheitsbeitrag je Nutzelement $i$ für den Stakeholder $S$ in der Kano-Kategorie $K$
z.B.	zum Beispiel
ZE	Zeiteinheiten
$ZG_i$	Zielgewichtung des Ziels $i$

## 8 Literaturverzeichnis

- [ABD+14] ANACKER, H.; BRENNER, C.; DOROCIAC, R.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; SCHÄFER, W.; VABHOLZ, M.: Methods for the Domain-Spanning Conceptual Design. In: Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 117-182
- [aca11] ACATECH (Hrsg.): Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion (acatech POSITION). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011
- [ADG+09] ADELTE, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTÜHR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZE, B.; VÖCKING, H.; WITTOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definition, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009
- [AEO04] ALBERS, A.; ECKERT, C.; OHMER, M.: Engineering Design in a Different Way: Cognitive Perspective on the Contact & Channel Model Approach. In: Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference Visual & Spatial Reasoning in Design, July 22<sup>nd</sup>-23<sup>rd</sup> 2004, Cambridge, 2004, pp. 1-21
- [AG98] ASIEDU, Y.; GU, P.: Product life cycle cost analysis: state of the art review. International Journal of Product Research, 36:4, 1998, pp. 883-908
- [AHH01] ADLER, J.; HALATA, E.S.; HOLBERT, N.B.: Kunden halten oder Märkte erobern? – Die Relevanz von Marktsegmentierung in einer vernetzten Gesellschaft. Economica Verlag, Heidelberg, 2001
- [Ahm95] AHMED, N. U.: A design and implementation model for life cycle cost management system. Information & Management, Volume 28, Elsevier, 1995, S. 261-269
- [AIS+95] ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M.; JACOBSON, M.; FIKSDAHLKING, I.; ANGEL, S.; CZECH, H.(HRSG.): Eine Muster-Sprache – Städte, Gebäude, Konstruktion. Löcker Verlag, Wien, 1995
- [AK09] ADELTE, P.; KLÖPPER, B.: Building Blocks and Prototypical Implementation of a Hybrid Planning Architecture. In: Klöpper, B.; Dangelmeier, W. (Eds.): Self-x in Engineering. September 15<sup>th</sup>-19<sup>th</sup> 2009, Paderborn, MV-Verlag, Münster, 2009, S. 55-67
- [Aka92] AKAO, Y.: QFD – Quality Function Deployment. Deutsche Übersetzung: Liesegang, G. (Hrsg.), Verlag Moderne Industrie, Landsberg, Lech, 1992
- [ARE10] ADELTE, P.; ROSE, M.; ESAU, N.: Hybride Planung zur Auswahl des optimalen RailCab-Verhaltens bezüglich der Umweltbedingungen und Streckeneigenschaften. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.-J.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 18.-19. März 2010, Heinz Nixdorf Institut, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010, S. 397-409
- [Arn01] ARNAOUT, A.: Anwendungsstand des Target Costing in deutschen Großunternehmen – Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. Controlling 13(2001)6, 2001, S. 289-299
- [Aut08] AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG) (Hrsg.): Potential Failure Mode and Effects Analysis. USA, 4<sup>th</sup> Edition, 2008
- [AW95] ASTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B.: Adaptive Control. Addison-Wesley, Reading Massachusetts et al., 2<sup>nd</sup> Edition, 1995
- [Ban07] BANDTE, H.: Komplexität in Organisationen. Dissertation Technische Universität Braunschweig, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2007

- [Bas09] BASU, R.: Implementing Six Sigma and Lean: A Practical Guide to Tools and Techniques. Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2009
- [BD13] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE E.V.; DEUTSCHE TELEKOM STIFTUNG (Hrsg.): Innovationsindikator Deutschland 2013. BDI, Berlin, Bonn, 2013
- [BDP+07] BRAUN, C.; DIEHL, H.; PETERMANN, M.; HELLENBRAND, D.; LINDEMANN, U.: Function Driven Process Design for the Development of Mechatronic Systems. In: Proceedings of 9<sup>th</sup> International Design Structure Matrix Conference, DSM'07, October 16<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> 2007, Munich, 2007, pp. 161-173
- [Bec06] BECK, C. H. (Hrsg.): SteuerG1 Steuergesetze 1 – EinkommenssteuerG, GewerbesteuerG, KörperschaftssteuerG, UmwandlungssteuerG, Fördergesetze, VermögensbildungsG, DurchführungsVOen. Deutscher Taschenbuchverlag, München, 32. Auflage, 2006
- [Bec09] BECK, C. H. (Hrsg.): HGB Handelsgesetzbuch – WechselG, ScheckG, WertpapierhandelsG, PublizitätsG. Deutscher Taschenbuchverlag, München, 48. Auflage, 2009
- [Ben05] BENDER, K.: Embedded Systems – Qualitätsorientierte Entwicklung. Springer-Verlag, Heidelberg, 2005
- [BEP+11] BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; WULFF, P.; WEIBER, R.: Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientiert Einführung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 13. Auflage, 2011
- [Ber71] BERTALANFFY, L. VON: General System Theory – Foundations, Development, Applications. Allen Lane the Penguin Press, London, 1971
- [Ber72] BERTALANFFY, L. VON: Vorläufer und Begründer der Systemtheorie. In: Bertalanffy, L. von; Cattell, R. B.; Dreger, W.; Ehrmann, H. W.; Fuchs-Wegner, G.; Haseloff, O. W.; Hassenstein, B.; Irle, M.; Kaplan, M. A.; Keidel, W. D.; Luhmann, N.; Meffert, M.; Menges, G.; Menke-Glückert, P.; Rapoport, A.; Scheuch, E.; Senghaas, D.: Systemtheorie. Colloquium Verlag Otto H. Hess, Berlin, 1972, S. 17-28
- [Beu08] BEUTIN, N.: Verfahren zur Messung der Kundenzufriedenheit im Überblick. In: Homburg, C. (Hrsg.): Kundenzufriedenheit – Konzepte – Methoden – Erfahrungen. Gabler Verlag, Wiesbaden, 7. Auflage, 2008, S. 122-171
- [BF11] BLANCHARD, B. B.; FABRYCKY, W.: Systems Engineering and Analysis. Prentice Hall, New Jersey, 5<sup>th</sup> Edition, 2011
- [BF91] BLANCHARD, B. B.; FABRYCKY, W.: Life-Cycle Cost and Economic Analysis. Prentice Hall, New Jersey, 1991
- [BHH+14] BÖCKER, J.; HEINZEMANN, C.; HÖLSCHER, C.; KEBLER, J. H.; KLEINJOHANN, B.; KLEINJOHANN, L.; PRIESTERJAHN, C.; RASCHE, C.; REINOLD, P.; ROMAU, C.; SCHIERBAUM, T.; SCHNEIDER, T.; SCHULTE, C.; SCHULZ, B.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; STILLE, K. S.; TRÄCHTLER, A.; ZIMMER, D.: Examples of Self-optimizing Systems. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, S. 27-64
- [BHL07] BRAUN, S.; HELLENBRAND, D.; LINDEMANN, U.: Kostentransparenz in der Mechatronik – Eine Studie über Komplexität und Kostentreiber mechatronischer Produkte. Shaker Verlag Online, 2007
- [Bir80] BIRKHOFFER, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980
- [BJ12-ol] BACKHAUS, K.; JASPER, J.: Auswahl geeigneter Pilotprojekte. It's OWL MarktLab, Arbeitspapier Nr. 01, Münster, 2012 unter: [http://www.marketingcenter.de/ias/forschung/Arbeitspapier\\_Nr.1\\_itsowl\\_MarktLab.pdf](http://www.marketingcenter.de/ias/forschung/Arbeitspapier_Nr.1_itsowl_MarktLab.pdf), 22. Oktober 2014

- [BKR+07] BUHL, H. U.; KUNDISCH, D.; RENZ, A.; SACKMANN, N.: Spezifizierung des Kano-Modells zur Messung von Kundenzufriedenheit. In: Oberweis, A. (Hrsg.): eOrganisation: Service, Prozess-, Market-Engineering, 8. Internationale Tagung Wirtschaftsinformatik, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2007, S. 879-896
- [Bla78] BLANCHARD, B. S.: Design and Manage to Life Cycle Cost. M/A Press, Portland, Oregon, 1978
- [Bla08] BLANCHARD, B. S.: System Engineering Management. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 4<sup>th</sup> Edition, 2008
- [BLL08] BRAUN, S. C.; BIEDERMANN, W.; LINDEMANN, U.: Design to Cost: New Impulses for Target Costing. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Design Conference, DESIGN 2008, May 19<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> May 2008, Dubrovnik, 2008, pp. 317-326
- [Boh93] BOHR, K.: Wirtschaftlichkeit. In: Chmielewicz, K.; Schweitzer, M. (Hrsg.): Handwörterbuch des Rechnungswesens. Schäfer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 3. völlig neu gestaltete und ergänzte Auflage, 1993, S. 2182-2188
- [BPV12] BECKER, J.; PROBANDT, W.; VERING, O.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung – Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2012
- [Bri10] BRINK, V.: Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 280, Paderborn, 2010
- [Bro64] BRONNER, A.: Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsrechnung. Beuth-Vertrieb GmbH, Frankfurt am Main, 1964
- [Bro10] BROY, M.: Cyber-Physical Systems – Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung. In: Broy, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovation durch Softwareintensive eingebettete Systeme. Acatech DISKUTIERT, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010, S. 17-31
- [Bru07] BRUHN, M.: Kundenorientierung – Bausteine für ein exzellentes Customer Relationship Management (CRM). Deutscher Taschenbuch Verlag, 3. Auflage, München, 2007
- [Bue09] BUEDE, D. M.: The Engineering Design of Systems – Models and Methods. 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2009
- [Bun14] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG BMBF (Hrsg.): Industrie 4.0 – Innovation für die Produktion von morgen. BMBF, Bonn, 2014
- [Bur97] BURGER, A.: Methode zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die rechnerintegrierte Produktion. Dissertation, Fachbereich 5 – Wirtschaftswissenschaften, Universität-Gesamthochschule Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 22, Paderborn, 1997
- [Bur99] BURGER, A.: Kostenmanagement. Oldenbourg Verlag, München, 3., vollständig überarbeitete Auflage, 1997
- [CFG12] COENENBERG, A. G.; FISCHER, T. M.; GÜNTHER, T.: Kostenrechnung und Kostenanalyse. Schäfer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 8. Auflage, 2012
- [Che81] CHECKLAND, P.: Systems Thinking, Systems Practice. John Wiley & Sons Ltd., London, 1981
- [CK88a] COOPER, R.; KAPLAN, S.: How cost accounting distorts product costs. Management Accounting: Apr 1988; 69, 10, 1988, pp. 20-27
- [CK88b] COOPER, R.; KAPLAN, S.: Measure Costs Right: Make the Right Decision. Harvard Business Review, September-October, 1988, pp. 96-103
- [CK92] COOPER, R.; KAPLAN, S.: Activity-Based Systems: Measuring the Costs of Resource Usage. Accounting Horizons/September 1992, 1992, pp. 1-13

- [Com94] COMMERFORD, R.: Mecha ... what?. IEEE Spectrum, 31(8), 46-49, IEEE Press, USA, 1994, pp. 46-49
- [Coy96] COYLE, R. G.: System Dynamics Modelling – A Practical Approach. Chapman & Hall, London, 1996
- [DAB+10] DAMM, W.; ACHATZ, R.; BEETZ, K.; BROY, M.; DAEMBKES, H.; GRIMM, K.; LIGGESMEYER, P.: Nationale Roadmap Embedded Systems. In: Broy, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovation durch Softwareintensive eingebettete Systeme. Acatech DISKUTIERT, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 67-136
- [DAG13] DUMITRESCU, R.; ANACKER, H.; GAUSEMEIER, J.: Design Framework for the Integration of Cognitive Functions into Intelligent Technical Systems. Production Engineering - Research and Development 7(1), 2013, pp. 111-121
- [DB13-ol] DEUTSCH BAHN AG (Hrsg.): Interessengruppen besser beachten – Stakeholderdialoge führen. Stand: 18. August 2013, unter: <https://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/stakeholderdialog/einleitung.html>, 22. Oktober 2014
- [Dep01] DEPARTMENT OF DEFENCE SYSTEMS MANAGEMENT COLLEGE: Systems Engineering Fundamentals. Defence Acquisition University Press, Fort Belvoir, 2001
- [DG11] DOROCIAC, R.; GAUSEMEIER, J.: Absicherung der Zuverlässigkeit komplexer mechatronischer Systeme auf Basis der domänenübergreifenden Prinzipiellösung. 25. Fachtagung Technische Zuverlässigkeit – TTZ2011, 11.-12. Mai 2011, Leonberg, 2011, S. 1-12
- [DG14] DOROCIAC, R.; GAUSEMEIER, J.: Early Probabilistic Reliability Analysis of an Advanced Mechatronic System Based on its Principle Solution. In: Rammig, F. J.; Schäfer, W.; Sextro, W.: Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 38-47
- [DGG+13] DOROCIAC, R.; GAUKSTERN, T.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.: A Methodology for the Improvement of Dependability of Self-optimizing Systems. Production Engineering - Research and Development 7(1), Springer-Verlag, Heidelberg, 2013, pp. 53-67
- [DGI+14] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.: From Mechatronic to Intelligent Technical Systems. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 2-5
- [DGK+09] DEYTER, S.; GAUSEMEIER, J.; KAISER, L.; POESCHEL, M.: Modeling and Analyzing Fault-Tolerant Mechatronic Systems. In: Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED'09), Volume 6, August, 24<sup>th</sup>-27<sup>th</sup>, Palo Alto, 2009, pp. 55-66
- [DGM+14] DOROCIAC, R.; GAUSEMEIER, J.; MEYER, T.; SEXTRO, W.; SONDERMANN-WÖLKE, C.: Early Design of the Multi-Level Dependability Concept. In: Rammig, F. J.; Schäfer, W.; Sextro, W.: Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 47-54
- [Dhi89] DHILLON, B. S.: Life Cycle Costing – Techniques, Models and Applications. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1989
- [DHK+09] DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRÜGER, M.; KRUPP, A.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009
- [DNL96] DESCHAMPS, J.-P.; NAYAK, P. R.; LITTLE, A. D.: Produktführerschaft – Wachstum durch offensive Produktstrategien. Aus dem Englischen von Mader, F., Campus Verlag, Frankfurt am Main, New York, 1996



- [Dor12] DOROCIAC, R.: Early Probabilistic Reliability Analysis of Mechatronic Systems. In: Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium RAMS, January 23<sup>th</sup>-26<sup>th</sup> 2012, Reno, 2012, pp. 1-6
- [Dud13a-ol] DUDEN: Duden online – Stichwort Adaption. Stand: 15. Januar 2013, <http://www.duden.de/node/724196/revisions/1088608/view>, 22. Oktober 2014
- [Dud13b-ol] DUDEN: Duden online – Stichwort adaptieren. Stand: 15. Januar 2013, unter: <http://www.duden.de/node/687662/revisions/1178789/view>, 22. Oktober 2014
- [Dud13c-ol] DUDEN: Duden online – Stichwort Analyse. Stand: 11. Januar 2013, unter: <http://www.duden.de/node/662439/revisions/1088801/view>, 22. Oktober 2014
- [Dud14-ol] DUDEN: Duden online – Stichwort System. Stand: 4. Februar 2014, unter: <https://www.duden.de/node/646938/revisions/1300483/view>, 22. Oktober 2014
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortschrittliche mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [EB94] EMBLEMSVÄG, J.; BRAS, B.: Activity-based Costing in Design for Product Retirement. Advances in Design Automation, Volume 2, 1994, S. 351-361
- [Ech14] ECHTERHOFF, N.: Systematik zur Planung von Cross-Industry-Innovationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 332, Paderborn, 2014
- [Ehr09] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [EKL07] EHRENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.: Kostengünstig entwickeln und konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer-Verlag, Heidelberg, 6., überarbeitete und korrigierte Auflage, 2007
- [Emb03] EMBLEMSVÄG, J.: Life-Cycle Costing – Using Activity-Based Costing and Monte Carlo Methods to Manage Future Costs and Risks. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003
- [Epp79] EPPEL, K.: Theorie und Praxis der Systemanalyse – Eine empirische Studie zur Überprüfung der Relevanz und Praktikabilität des Systemansatzes. Dissertation, Universität Konstanz, Minerva Publikation Saur GmbH, München, 1979
- [EU02] EGGERT, A.; ULAGA, W.: Customer perceived value: a substitute for satisfaction in business markets?. Journal of Business & Industrial Marketing, Volume 17, Number 2/3, 2002, pp. 107-118
- [FB91] FABRYCKY, W. J.; BLANCHARD, B. S.: Life-Cycle Cost and Economic Analysis. Prentice Hall Int., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991
- [FGG+13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.; GÖPFERT, J.; TRETOW, G.: Technische Systeme. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung. Springer-Verlag, Heidelberg, 8. Auflage, 2013, S. 237-283
- [FGK+13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.; KOCHAN, D.; BEYER, C.; VAJNA, S.; LASHIN, G.; KAUF, F.; GAUB, H.; SCHACHT, M.; ERK, P.: Die PEP-begleitenden Prozesse. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung. Springer-Verlag, Heidelberg, 8. Auflage, 2013, S. 25-236
- [FGN+13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.; NAGARAJAH, A.; PAHL, G.; BEITZ, W.; WARTZACK, S.: Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung. Springer-Verlag, Heidelberg, 8. Auflage, 2013, S. 291-410

- [FKH+94] FISCHER, J.; KOCH, R.; HAUSCHULTE, K.-B.; JAKUSCHONA, K.: Design to Cost – Entwicklungsbegleitende Prozeßkostenprognose und Zielkostenermittlung im Produktlebenszyklus. In: Tagungsband CAD '94 – Produktdatenmodellierung und Prozeßmodellierung als Grundlage neuer CAD-Systeme, Paderborn, 1994, S. 463-476
- [FMN+94] FENELON, P.; MCDERMID, J. A.; NICOLSON, M.; PUMFREY, M.: Towards Integrated Safety Analysis and Design. In: ACM SIGAPP Applied Computing Review 2(1), 1994, pp. 21-33
- [Föl08] FÖLLINGER, O.: Regelungstechnik – Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Hüthig Verlag, Heidelberg, 10., durchgesehene Auflage, 2008
- [For69] FORRESTER, J. W.: Industrial Dynamics. The M.I.T Press, 6<sup>th</sup> Edition, Cambridge, London, 1969
- [For72] FORRESTER, J. W.: Grundzüge einer Systemtheorie (Principles of Systems). Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, 1972
- [For73] FORRESTER, J. W.: Urban Dynamics. The M.I.T Press, 4<sup>th</sup> Edition, Cambridge, London, 1973
- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinzipiellösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [FS06] FINK, A.; SIEBE, A.: Handbuch Zukunftsmanagement – Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung. Campus Verlag, Frankfurt/Main, 2006
- [Fuc72] FUCHS-WEGNER, G.: Verfahren der Analyse von Systemen. In: Bertalanffy, L. von; Cattell, R. B.; Dreger, W.; Ehrmann, H. W.; Fuchs-Wegner, G.; Haseloff, O. W.; Hassenstein, B.; Irle, M.; Kaplan, M. A.; Keidel, W. D.; Luhmann, N.; Meffert, M.; Menges, G.; Menke-Glückert, P.; Rapoport, A.; Scheuch, E.; Senghaas, D.: Systemtheorie. Colloquium Verlag Otto H. Hess, Berlin, 1972, S. 82-90
- [FWG97] FLINT, D. J.; WOODRUFF, R. B.; GARDIAL, S. F.: Customer Value Change in Industrial Marketing Relationships – A Call for New Strategies and Research. Industrial Marketing Management 26, Elsevier Science Inc., New York, 1997, pp. 163-175
- [Gäl05] GÄLWEILER, A.: Strategische Unternehmensführung. Campus Verlag, Frankfurt am Main, 2005
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GB12] GEISBERGER, E.; BROY, M. (Hrsg.): agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems (Acatech STUDIE), Springer-Verlag, Heidelberg, 2012
- [GDJ+14] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; JASPERNEITE, J.; KÜHN, A.; TRESK, H.: Der Spitzencluster it's OWL auf dem Weg zu Industrie 4.0. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 5/2014, 2014, S. 336-346
- [GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; WIEDERKEHR, O.; TSCHIRNER, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Produktentstehung, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT – Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik, UNITY AG, Paderborn, 2013
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K.: Integrierte Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GFD+09] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Specification Technique for the Description of Self-optimizing Mechatronic Systems. Research in Engineering Design 20(4), Springer-Verlag, London, 2009, pp. 201-223

- [Gie00] GIERING, A.: Der Zusammenhang zwischen Kundenzufriedenheit und Kundenloyalität – Eine Untersuchung moderierender Effekte. Dissertation, Universität Mannheim, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2000
- [GIV+14] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.; REINHART, F.: Selbstoptimierung im Maschinen- und Anlagenbau – Durch Selbstoptimierung intelligente technische Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus entwickeln. *Industrie Management* 6(14) 55, 2014, S. 51-54
- [GKP09] GAUSEMEIER, J.; KAISER, L.; POOK, S.: FMEA von komplexen mechatronischen Systemen auf Basis der Spezifikation der Prinzipiösung. *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 11/2009, 2009, S. 1011-1017
- [GKP+14] GROESBRINK, S.; KORF, S.; PORRMANN, M.; PRIESTERJAHN, C.; STAHL, K.: Self-optimization by Reconfiguration. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: *Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, S. 19-22
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U.: Produkt und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GLR+00] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering – Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000
- [Goe13] GOEPEL; K. D.: Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making in Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs. In: *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*, June, 23<sup>rd</sup> – 26<sup>th</sup> 2013, Kuala Lumpur, 2010, pp. 1-10
- [Goe13-ol] GOEPEL; K. D.: BPMSG AHP Excel template with multiple inputs. Version 2014-07-27, Singapore, 2013 unter: <http://bpmsg.com/new-ahp-excel-template-with-multiple-inputs/>, 26. September 2014
- [Gou06] GOURVILLE, J. T.: Wann Kunden neue Produkte kaufen. *Harvard Business manager*, Ausgabe 8/2006, manager magazin Verlagsgesellschaft, Hamburg, 2006, S. 45-57
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensführung. Carl Hanser Verlag, München, 2., überarbeitete Auflage, 2014
- [GRS14] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F. J.; SCHÄFER, W.: *Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014
- [GRS+14] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F. J.; SCHÄFER, W.; SEXTRO, W.: *Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014
- [GS12] GROESSER, S. N.; SCHAFFERNICHT, M.: Mental models of dynamic systems: taking stock and looking ahead. *System Dynamics Review*, Volume 28, No. 1, 2012, pp. 46-68
- [GSD+09] GAUSEMEIER, J.; STEFFEN, D.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Conceptual Design of Modularized Advanced Mechatronic Systems. In: *Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED'09)*. August 24<sup>th</sup>-27<sup>th</sup> 2007, Stanford, USA, 2009, pp. 263-274
- [GTD13] GAUSEMEIER, J.; TSCHIRNER, C.; DUMITRESCU, R.: Der Weg zu Intelligenten Technischen Systemen – Spitzencluster it's OWL – Mit Intelligenten Technischen Systemen an die Spitze. *Industrie Management* 29(2013), 2013, S. 49-52
- [GTV12] GAUSEMEIER, J.; TSCHIRNER, C.; VABHOLZ, M.: Systems Thinking: Sensitizing for Systems Engineering – Experiences from academic teaching and industry workshops. In: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Product Design Education*, September 6<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> 2012, Antwerp, 2012, pp. 801-806

- [Gut58] GUTENBERG, E.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 1958
- [GV14a] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Design Methodology for Self-optimizing Systems. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 66-69
- [GV14b] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Domain-Spanning Conceptual Design. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 69-74
- [GV14c] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Development of Self-Optimizing Systems. In: Rammig, F. J.; Schäfer, W.; Sextro, W.: Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 25-36
- [GZD+08] GAUSEMEIER, J.; ZIMMER, D.; DONOTH, J.; POOK, S.; SCHMIDT, A.: Proceeding for the Conceptual Design of Self-optimizing Mechatronic Systems. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Design Conference, DESIGN 2008, May 19<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> May 2008, Dubrovnik, 2008, pp. 1277-1286
- [GZF+07] GAUSEMEIER, J.; ZIMMER, D.; FRANK, U.; POOK, S.; SCHMIDT, A.: Conceptual Design of Self-optimizing Systems by a Magnetic Linear Drive. In: Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED'07). August 28<sup>th</sup>-30<sup>th</sup> 2007, Paris, 2007, pp. 1-12
- [Har67] HARE, V.C. JR.: Systems Analysis: A Diagnostic Approach. Harcourt, Brace & World Inc., New York, 1967
- [Has72a] HASELOFF, O. W.: Kommunikation, Transformation und Interaktion bei lernfähigen Systemen. In: Bertalanffy, L. von; Cattell, R. B.; Dreger, W.; Ehrmann, H. W.; Fuchs-Wegner, G.; Haseloff, O. W.; Hassenstein, B.; Irle, M.; Kaplan, M. A.; Keidel, W. D.; Luhmann, N.; Meffert, M.; Menges, G.; Menke-Glückert, P.; Rapoport, A.; Scheuch, E.; Senghaas, D.: Systemtheorie. Colloquium Verlag Otto H. Hess, Berlin, 1972, S. 57-81
- [Has72b] HASENSTEIN, B.: Element und System – geschlossene und offene Systeme. In: Bertalanffy, L. von; Cattell, R. B.; Dreger, W.; Ehrmann, H. W.; Fuchs-Wegner, G.; Haseloff, O. W.; Hassenstein, B.; Irle, M.; Kaplan, M. A.; Keidel, W. D.; Luhmann, N.; Meffert, M.; Menges, G.; Menke-Glückert, P.; Rapoport, A.; Scheuch, E.; Senghaas, D.: Systemtheorie. Colloquium Verlag Otto H. Hess, Berlin, 1972, S. 29-38
- [HB08] HOMBURG, C.; BUCERIUS, M.: Kundenzufriedenheit als Managementherausforderung. In: Homburg, C. (Hrsg.): Kundenzufriedenheit – Konzepte – Methoden – Erfahrungen. Gabler Verlag, Wiesbaden, 7. Auflage, 2008, S. 53-90
- [HD97] HOMBURG, C.; DAUM, D.: Marktorientiertes Kostenmanagement – Kosteneffizienz und Kundennähe verbinden. Frankfurter Allgemeine Zeitung, Verlagsbereich Wirtschaftsbücher, Frankfurt am Main, 1997
- [HDS+08] HASSAN, A.; DAYARIAN, I.; SIADAT, A.; DANTAN J.-Y.: Cost-based FMEA and ABC Concepts for Manufacturing Process Plan Evaluation. In: Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Security, CIS 2008, December 13<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> 2008, Suzhou, 2008, pp. 179-202
- [Hea03] HEATH, S.: Embedded Systems Design. 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier Science, Oxford, 2003
- [HFW+12] HABERFELLNER, R.; FRICKE, E.; WECK, O. DE; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli Verlag, Zürich, 12. Auflage, 2012
- [HH98] HAHN, D.; HINTZE, M.: Konzepte wertorientierter Unternehmensführung. In: Handbauer, G.; Matzler, K.; Sauerwein, E.; Stumpf, M. (Hrsg.): Perspektiven im Strategischen Management – Festschrift anlässlich des 60. Geburtstags von Gernot Handbauer. de Gruyter, Berlin, 1998, S. 59-92

- [HHB09] HUBER, F.; HERRMANN, A.; BRAUNSTEIN, C.: Messung von Kundenzufriedenheit. In: Hinterhuber, H. H.; Matzler, K. (Hrsg.): Kundenorientierte Unternehmensführung – Kundenorientierung – Kundenzufriedenheit – Kundenbindung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, 2009, S. 70-85
- [HHM03] HINTERHUBER, H. H.; HANDLBAUER, G.; MATZLER, K.: Kundenzufriedenheit durch Kernkompetenzen – Eigene Potentiale erkennen, entwickeln, umsetzen. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, 2., überarbeitete Auflage, 2003
- [HHS+07] HORX, M.; HUBER, J.; STEINLE, A.; WENZEL, E.: Zukunft machen – Wie sie von Trends zu Business-Innovationen kommen. Campus Verlag, Frankfurt/Main, 2007
- [Hin09] HINTERHUBER, A.: Pricing und Kundenzufriedenheit. In: Hinterhuber, H. H.; Matzler, K. (Hrsg.): Kundenorientierte Unternehmensführung – Kundenorientierung – Kundenzufriedenheit – Kundenbindung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, 2009, S. 490-505
- [Hir88] HIROMOTO, T.: Another Hidden Edge – Japanese Management Accounting. Harvard Business Review, 10, 1988, Nr. 4, S. 22-26
- [Hit07] HITCHENS, D. K.: Systems Engineering: A 21<sup>st</sup> Century Systems Methodology. John Wiley & Sons, West Sussex, 2007
- [HJL+94] HESKETT, J. L.; JONES, T. O.; LOVEMAN, G. W.; SASSER, W. E. JR.; SCHLESINGER, L. A.: Putting the Service-Profit Chain to Work. Harvard Business Review, March–April, 1994, pp. 164-174
- [Hom12] HOMBURG, C.: Marketingmanagement – Strategien – Instrumente – Umsetzung – Unternehmensführung. Springer Gabler Verlag, Heidelberg, 4. Auflage, 2013
- [Hor93] HORVÁTH, P. (Hrsg.): Target Costing – Marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993
- [Hor98] HORX, M.: Trendbüro – Megatrends für die späten neunziger Jahre. Trendbuch 2. Econ Executive Verlags GmbH, Düsseldorf, 3. Auflage, 1998
- [HP95] HAMEL, P.; PRAHALAD, C.: Wettlauf um die Zukunft: Wie Sie mit bahnbrechenden Strategien die Kontrolle über Ihre Branche gewinnen und die Märkte von morgen schaffen. Wirtschaftsverlag Ueberreuter, Wien, 1995
- [HPT97] HAWLEY, M.; POOR, R.D.; TUTEJA, M.: Things that Think. Personal Technologies (1997), Springer-Verlag, London, 1997, pp. 13-20
- [HS08] HOMBURG, C.; STOCK-HOMBURG, R.: Theoretische Perspektiven zur Kundenzufriedenheit. In: Homburg, C. (Hrsg.): Kundenzufriedenheit – Konzepte, Methoden, Erfahrungen, Gabler Verlag, Wiesbaden, 7., überarbeitete Auflage, 2008, S. 19-51
- [HSS97] HESKETT, J. L.; SASSER, W. E. JR.; SCHLESINGER, L. A.: The Service Profit Chain – How leading Companies Link Profit Chain and Growth to Loyalty, Satisfaction, and Value. The Free Press, New York, 1997
- [HTF96] HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T.: Mechatronics – „What Is It, Why and How? – An Editorial. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume 1, No. 1, 1996, S. 1-5
- [Hub84] HUBKA, V.: Theorie Technischer Systeme – Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Springer-Verlag, Heidelberg, 1984
- [IKD+13] IWANEK, P.; KAISER, L.; DUMITRESCU, R.; NYSSSEN, A.: Fachdisziplinübergreifende Systemmodellierung mechatronischer Systeme mit SysML und CONSENS. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering, Carl Hanser Verlag, München, 2013, S. 337-346
- [ILM92] ISERMANN, R.; LACHMANN, K.-H.; MATKO, D.: Adaptive Control Systems, Prentice-Hall, Hemel Hempstead, 1992

- [IMP+14] IWANEK, P.; MEYER, T.; PRIESTERJAHN, C.; SEXTRO, W.; VABHOLZ, M.: Challenges. In: Rammig, F. J.; Schäfer, W.; Sextro, W.: Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 12-15
- [Int04-ol] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING INCOSE (Ed.): What is Systems Engineering?. Stand: 14. Juni 2004, unter: <http://www.incose.org/practice/fellowsconsensus.aspx>, 22. Oktober 2014
- [Int07] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING INCOSE (Ed.): Systems Engineering Vision 2020. INCOSE-TP-2004-004-2, Version/Revision: 2.03, September 2007
- [Ise08] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [Jan07] JANOCHA, H. (Ed.): Adaptronics and Smart Structures – Basics, Materials, Design and Applications. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2007
- [JKK+14] JUNGMAN, A.; KLEINJOHANN, B.; KLEINJOHANN, L.; RASCHE, C.; SCHIERBAUM, T.: Miniatur Robot BeBot. In: Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schaefer, W.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 50-56
- [Kah13] KAHL, S.: Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 308, Paderborn, 2013
- [Kai14] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2014
- [Kal13] KALLA, H.: Industrie 4.0: der Weg ist geebnet. In: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.): etz elektronik & automation. Ausgabe S2, VDE Verlag, 2013, S. 38-41
- [KAS+07] KOTLER, P.; ARMSTRONG, G.; SAUNDERS, J.; WONG, V.: Grundlagen des Marketing. Pearson Studium, München, 4. Auflage, 2007
- [KB01] KOTLER, P.; BLIEMEL, F.: Marketing-Management – Analyse, Planung und Verwirklichung. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 10., überarbeitete und aktualisierte Auflage, 2001
- [Kel93] KELLER, K. L.: Conceptualizing, Measuring, and Managing Customer-Based Brand Equity. Journal of Marketing, 57 (January), American Marketing Association, Chicago, 1993, pp. 1-22
- [KFG02] KRALLMANN, H.; FRANK, H.; GRONAU, N.: Systemanalyse im Unternehmen – Vorgehensmodelle, Modellierungsverfahren und Gestaltungsoptionen. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 4., vollständig überarbeitete Auflage, 2002
- [KH98] KAAPKE, A.; HUDETZ, K.: Der Einsatz des Kano-Modells zur Ermittlung von Indikatoren der Kundenzufriedenheit – dargestellt am Beispiel der Anforderungen von Senioren an Reisebüros. Jahrbuch der Absatz- und Verbrauchsforschung, Spezialausgabe „Kundenzufriedenheit“, 3/98, 1998, S. 267-287
- [KH99] KLOPP, M.; HARTMANN, M. (Hrsg.): Das Fledermaus-Prinzip. Strategische Früherkennung für Unternehmen. Logis Verlag, Stuttgart, 1999
- [KI00] KMENTA, S.; ISHIL, K.: Scenario-based FMEA: A Life Cycle Cost Perspective. In: Proceedings of Design Engineering Technical Conference DETC 2000, September 10<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> 2000, Baltimore, 2000, pp. 1-11
- [KKB+09] KOTLER, P.; KELLER, K. L.; BRADY, M.; GOODMAN, M.; HANSEN, T.: Marketing Management. Pearson Economic Limited, Essex, 2009
- [KKK95] KRSTIĆ, M.; KANELAKOPOULOS, I.; KOKOTOVIĆ, P.: Nonlinear and Adaptive Control Design. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995

- [KKT+13] KEBLER, J. H.; KRÜGER, M.; TRÄCHTLER, A.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.: Erstellung von Prozessmodellen für den Entwurf selbstoptimierender Regelungen. In: Internationales Forum Mechatronik 2013, 30.-31. Oktober 2013, Winterthur, 2013, pp. 1-20
- [KLW11] KAGERMANN, H.; LUKAS, W.-D.; WAHLSTER, W.: Industrie 4.0 – Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution. In: VDI Nachrichten 13, VDI Verlag, Düsseldorf, 2011, S. 2
- [KM05] KIM, W. C.; MAUBORGNE, R.: Der blaue Ozean als Strategie – Wie man neue Märkte schafft, wo es keine Konkurrenz gibt. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2005
- [KN12] KOHN, S.; NIETHAMMER, R.: Der Weg zum kundenorientierten Produkt. In: Barske, H.; Gery-Badze, A.; Sommerlatte, T.: Digitale Fachbibliothek Innovationsmanagement. Symposium Publishing, Düsseldorf, 2012, S. 1-20
- [Köc04] KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 142, Paderborn, 2004
- [Koc58] KOCH, H.: Zur Diskussion über den Kostenbegriff. In: Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, Volume 10.1958, 7/8, Westdeutscher Verlag, Köln, 1958, S. 355-399
- [Koc70] KOCH, H.: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 1970
- [Kol98] KOLLER, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Springer-Verlag, Heidelberg, 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage, 1998
- [Kor72] KOREIMANN, D. S.: Systemanalyse. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1972
- [Kos69] KOSIOL, E.: Kostenrechnung und Kalkulation. Sammlung Götschen Band 1214/1214a, Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1969
- [Kos79] KOSIOL, E.: Kosten- und Leistungsrechnung – Grundlagen, Verfahren, Anwendungen. Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1979
- [KPS+14] KORF, S.; PORRMANN, M.; STAHL, K.; SUDMANN, O.; VABHOLZ, M.: Domain-Specific Design and Development. Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 74-95
- [Kre97] KREUZ, W.: Kosten-Benchmarking: Konzept und Praxisbeispiel. In: Franz, K.-P.; Kajüter, P. (Hrsg.): Kostenmanagement – Wettbewerbsvorteile durch systematische Kostensteuerung. USW-Schriften für Führungskräfte, Schäffer-Poeschel Verlag, Band 33, Stuttgart, 1997, pp. 277-291
- [KST+84] KANO, N.; SERAKU, N.; TAKAHASHI, F.; FSUJI, S.: Attractiv Quality and Must be Quality. In: Quality Journal, 14, Nr. 2, 1984, S. 39-48
- [KSW13] KAFFENBERGER, R.; SCHULZE, S.-O.; WEBER, H. (Hrsg.): INCOSE Systems Engineering Handbuch. V.3.2.2-de, GfSE-HB-001-01b, Hanser Verlag, München, Ausgabe Februar, 2013
- [Küh91] KÜHN, R.: Methodische Überlegungen zum Umgang mit Kundenorientierung im Marketing-Management. Marketing ZFP, 13. Jahrgang, Nr. 2, 1991, S. 97-107
- [KWH13] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, H. (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech, 2013
- [LAR+04] LAPRIE, J.C.; AVIZIENIS, A.; RANDELL, B.; LANDWEHR, C.: Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Volume 1, Number 1, IEEE Computer Society, 2004

- [LHL01] LÜCKEL, J.; HESTERMEYER, T.; LIU-HENKE, X.: Generalization of the Cascade Principle in View of a Structure Form of Mechatronic Systems. In: Proceedings of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 8<sup>th</sup>-12<sup>th</sup> 2001, Como, 2001, pp. 123-128
- [Lin05] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005
- [Lin09] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer-Verlag, Berlin, 3., korrigierte Auflage, 2009
- [LMB09] LINDEMANN, U.; MAURER, M.; BRAUN, T.: Structural Complexity Management – An Approach for the Field of Product Design. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [Lüt07] LÜTHJE, C.: Methoden zur Sicherstellung von Kundenorientierung in den frühen Phasen des Innovationsprozesses. In: Herstatt, C.; Verworn, B.: Management der frühen Innovationsphasen: Grundlagen – Methoden – Neue Ansätze. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2. Auflage, 2007, S. 39-60
- [Mac65] MACHOL, R. E.: Methodology of Systems Engineering. In: Machol, R. E. (Hrsg.): System Engineering Handbook. McGraw-Hill Inc., New York, San Francisco, 1965, pp. 1-3-1-13
- [Mai98] MAIER, M. W.: Architecting Principles for Systems-of-Systems. In: Systems Engineering 1(4), John Wiley & Sons, West Sussex, 1998, pp. 267-284
- [Mat65] MATERNA, P.: Operative Auffassung der Methode – Ein Beitrag zur strukturellen Methodologie. Nakad. Ceskoslov. Akad. Ved, Praha, 1965
- [MAW97] MITCHELL, R. K.; AGLE, B. R.; WOOD, D. J.: Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of Who and What Really Counts. In: Academy of Management Review. Vol. 22, No. 4, October, 1997, pp. 853-886
- [MB09] MATZLER, K.; BAILOM, F.: Messung von Kundenzufriedenheit. In: Hinterhuber, H. H.; Matzler, K. (Hrsg.): Kundenorientierte Unternehmensführung – Kundenorientierung – Kundenzufriedenheit – Kundenbindung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, 2009, S. 268-297
- [MED+13] MÜNCHENER KREIS E.V.; EUROPEAN CENTER FOR INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (EICT) GMBH; DEUTSCHE TELEKOM; FLUGHAFEN MÜNCHEN GMBH; TNS INFRATEST GMBH; ZWEITES DEUTSCHES FERNSEHEN (Hrsg.): Innovationsfelder der digitalen Welt – Bedürfnisse von übermorgen. Zukunftsstudie Münchener Kreis, Band V, Industriepress, München, 2013
- [Men65] MENRAD, S.: Der Kostenbegriff – Eine Untersuchung über den Gegenstand der Kostenrechnung. Betriebswirtschaftliche Schriften, Heft 16, Duncker & Humboldt, Berlin, 1965
- [Mis75] MISHAN, E. J.: [Elemente] Grundlagen der Kosten-Nutzen-Analyse. Campus Verlag, Frankfurt am Main, 1975
- [ML11] MÜLLER-STEWENS, G.; LECHNER, C.: Strategisches Management – Wie strategische Initiativen zum Wandel führen. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 4., überarbeitete Auflage, 2011
- [Mon89] MONDEN, Y.: Total Cost Management System in Japanese Automobile Cooperations. In: Monden, Y.; Sakurai, M. (Hrsg.): Japanese Management Accounting: A World Class Approach to Profit Management. Productivity Press, Cambridge, 1989, S. 15-33
- [Mor69] MORI, T.: Yaskawa Internal Trademark Application Memo, 21.131.01. July, 1969
- [MS00] MATZLER, K.; STAHL, H.: Kundenzufriedenheit und Unternehmenswert. In: DBW 60 (2000) 5, 2000, S. 626-639
- [MSH09] MATZLER, K.; STAHL, H. K.; HINTERHUBER, H. H.: Die Customer-based View der Unternehmung. In: Hinterhuber, H. H.; Matzler, K. (Hrsg.): Kundenorientierte Unternehmensführung – Kundenorientierung – Kundenzufriedenheit – Kundenbindung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, 2009, S. 5-31



- [MSS09] MATZLER, K.; SAUERWEIN, E.; STARK, C.: Methoden zur Identifikation von Basis-, Leistungs- und Begeisterungsfaktoren. In: Hinterhuber, H. H.; Matzler, K. (Hrsg.): Kundenorientierte Unternehmensführung – Kundenorientierung – Kundenzufriedenheit – Kundenbindung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, 2009, S. 320-342
- [Mül90] MÜLLER, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften – Systematik, Heuristik, Kreativität. Springer-Verlag, Heidelberg, 1990
- [MV85] MILLER, J. G.; VOLLMAN, T. E.: The hidden factory – Cutting the explosive growth of overhead costs requires mastery of more than just what happens on the shop floor. Harvard Business Review, September-October, 1985, pp. 142-150
- [Nau00] NAUMANN, R.: Modellierung und Verarbeitung vernetzter intelligenter mechatronischer Systeme. Fortschrittsbericht VDI Reihe 20, Nr. 318, VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [Nie09] NIEMANN, J.: Life Cycle Management – Das Paradigma der ganzheitlichen Produktlebenslaufbetrachtung. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung. Springer-Verlag, Heidelberg, 3., neu bearbeitete Auflage, 2009, S. 224-235
- [Oli10] OLIVER, R. L.: Satisfaction – A Behavioral Perspective on the Consumer. M.E.Sharpe, Armonk, London, 2<sup>nd</sup> Edition, 2010
- [Pat82] PATZAK, G.: Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme – Grundlagen, Methoden, Techniken. Springer-Verlag, Berlin, New York, 1982
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendungen. Springer-Verlag, Heidelberg, 7. Auflage, 2007
- [PBF+13] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Erstellung eines Konzepts für das Produkt. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung. Springer-Verlag, Heidelberg, 8. Auflage, 2013, S. 341-409
- [Pil07] PILLKAHN, U.: Trends und Szenarien als Werkzeuge zur Strategieentwicklung – Wie Sie die unternehmerische und gesellschaftliche Zukunft planen und gestalten. Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2007
- [Poh07] POHL, K.: Requirements Engineering. dpunkt.verlag, Heidelberg, 2007
- [Poo11] POOK, S.: Eine Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 296, Paderborn, 2011
- [Püm92] PÜMPIN, C.: Das Dynamik-Prinzip – Zukunftsorientierungen für Unternehmen und Manager. ECON Taschenbuch Verlag, Düsseldorf, Wien 1980
- [RI02] RHEE, S. J.; ISHII, K.: Life Cost-based FMEA Incorporating Data Uncertainty. In: Proceedings of Design Engineering Technical Conference DETC 2002, September 29<sup>th</sup>-October 2<sup>nd</sup> 2002, Montreal, 2002, pp. 1-10
- [RI04] RHEE, S. J.; ISHII, K.: Using Cost Based FMEA to enhance reliability and serviceability. Advanced Engineering Informatics 17 (2003), Elsevier, 2004, pp. 179-188
- [Rie90] RIEBEL, P.: Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung – Grundfragen einer markt- und entscheidungsorientierten Unternehmensrechnung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 6., wesentlich erweiterte Auflage, 1990
- [Roh08-ol] ROHDE, T.: The Straight Dope on Mechatronics – Yaskawa, the company that invented the term, describes its evolution. Unter: <http://supplier.yaskawa.com/site/aboutYEA.nsf/about/86256E8300693011862574A60055746C?opendocument>, 22. Oktober 2014

- [Rom13] ROMAUS, C.: Selbstoptimierende Betriebsstrategien für ein hybrides Energiespeichersystem aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren. Dissertation Universität Paderborn, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Band 3, Shaker Verlag, Aachen, 2013
- [RS92] RINZA, P.; SCHMITZ, H.: Nutzwert-Kosten-Analyse: Eine Entscheidungshilfe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2. Auflage, 1992
- [RT14] REINOLD, P.; TRÄCHTLER, A.: X-by-Wire Test Vehicle. In: Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schaefer, W: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 56-61
- [Saa80] SAATY, T. L.: The Analytic Hierarchy Process – Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, Inc., London, 1980
- [Sau00] SAUERWEIN, E.: Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit – Reliabilität und Validität einer Methode zur Klassifizierung von Produkteigenschaften. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2000
- [SB14] STILLE, K. S.; BÖCKER, J.: Crosslinked Test Bench. In: Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schaefer, W: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 46-48
- [SB89] SASTRY, S.; BODSON, M.: Adaptive Control – Stability, Convergence, and Robustness. Prentice-Hall, New Jersey, 1989
- [SBI14-ol] STRATEGIC BUSINESS INSIGHTS (Hrsg.): VALS. unter: <http://www.strategicbusinessinsights.com/vals/>, 22. Oktober 2014
- [Sch25] SCHMALENBACH, E.: Grundlagen der Selbstkostenrechnung und Preispolitik. G.A. Gloeckner Verlagsbuchhandlung, Leipzig, 1925
- [Sch39] SCHUMPETER, J. A.: Business Cycles – A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process. Martino Pub, New York, London, 1939
- [Sch56] SCHMALENBACH, E.: Kostenrechnung und Preispolitik. Westdeutscher Verlag, Köln, 7., überarbeitete Auflage, 1956
- [Sch68] SCHNEIDER, E.: Wirtschaftlichkeitsrechnung – Theorie der Investition. Polygraphischer Verlag A.G., Zürich, 7., verbesserte und erweiterte Auflage, 1968
- [Sch73] SCHUSSMANN, K.: Die Paretianische Kosten-Nutzen-Analyse. Münchener Universitäts-Schriften, Verlag Michael Lassleben Kallmünz OPF, Band 3, München, 1973
- [Sch74] SCHELLER, P.: Systematische Untersuchung bisheriger Anwendungen der Nutzwertanalyse Zwecks Bestimmung der Möglichkeiten und Grenzen dieser Bewertungsmethode. Brennpunkt Systemtechnik, Technische Universität Berlin, Bericht 2/1974, Berlin, 1974
- [Sch86] SCHULTE, K.-W.: Wirtschaftlichkeitsrechnung. Physica-Verlag, Heidelberg, 4. Auflage, 1986
- [Sch93] SCHERRER, G.: Gewinn und Verlust. In: Chmielewicz, K.; Schweitzer, M. (Hrsg.): Handwörterbuch des Rechnungswesens. Schäfer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 3., völlig neu gestaltete und ergänzte Auflage, 1993, S. 738-747
- [Sch00] SCHERNIKAU, J.: Gestaltung mechatronikgerechter Organisationen in der Produktentwicklung. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [Sch08] SCHMIDT, A.: Kostenrechnung – Grundlagen der Vollkosten-, Deckungsbeitrags- und Plankostenrechnung sowie des Kostenmanagements. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2008

- [Sch12] SCHAUBENBERG, J.: Innovation und Nutzen. In: Barske, H.; Gery-Badze, A.; Sommerlatte, T.: Digitale Fachbibliothek Innovationsmanagement. Symposium Publishing, Düsseldorf, 2012, S. 1-41
- [Sch13] SCHMIDT, A.: Situationsbezogene Luftspaltoptimierung am Linearmotor eines schienengebundenen Fahrzeugs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Der Andere Verlag, Konstruktions- und Antriebstechnik, Band 5, Uelvesbüll, 2013
- [Sei93] SEIDENSCHWARZ, W.: Target Costing – Marktorientiertes Zielkostenmanagement. Dissertation, Universität Stuttgart, Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 1993
- [SEN+97] SEIDENSCHWARZ, W.; ESSER, J.; NIEMAND, S.; RAUCH, M.: Target Costing – Auf dem Weg zum marktorientierten Unternehmen. In: Franz, K.-P.; Kajüter, P. (Hrsg.): Kostenmanagement – Wettbewerbsvorteile durch systematische Kostensteuerung. USW-Schriften für Führungskräfte, Schäffer-Poeschel Verlag, Band 33, Stuttgart, 1997, pp. 101-126
- [Sen13] SENDLER, U.: Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Springer-Verlag, Heidelberg, 2013
- [SF06] SILVA, A. P.; FERNANDES, A. A.: Integrating Life Cycle Cost Analysis into the Decision Making Process in new Product Development. In: Proceedings of the International Design Conference, DESIGN 2006, May 15<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> May 2006, Dubrovnik, 2006, pp. 1419-1426
- [SFB04] SFB 614: SONDERFORSCHUNGSBEREICH 614: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus — Finanzierungsantrag 2. Halbjahr 2005 bis 1. Halbjahr 2009. Universität Paderborn, Paderborn, 2004
- [SFB08] SFB 614: SONDERFORSCHUNGSBEREICH 614: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus — Finanzierungsantrag 2. Halbjahr 2009 bis 1. Halbjahr 2013. Universität Paderborn, Paderborn, 2008
- [SFC01] SRIVASTAVA, R. K.; FAHEY, L.; CHRISTENSEN, H. K.: The resource-based view and marketing: The role of market-based assets in gaining competitive advantages. Journal of Management 27 (2001), Elsevier Science Inc., New York, 2001, pp. 777-802
- [SG08] SCHWANINGER, M.; GROESSER, S. N.: System Dynamics as Model-Based Theory Building. Systems Research and Behavioral Science, Syst. Res. 25, 2008, pp. 447-465
- [SI13-ol] SINUS INSTITUT (Hrsg.): Sinus-Milieus. unter: <http://www.sinus-institut.de/loesungen/sinus-milieus.html>, Stand: 2013, 22. Oktober 2014
- [Sie12] SIEMENS AG: Digitale Zukunft. Industry Journal 02/2012, Erlangen, 2012, S. 10-18
- [SN94] SLATER, S. F.; NARVER, J. C.: Market Orientation, Customer Value, and Superior Performance. Business Horizons, March-April, 1994, pp. 22-28
- [Spa12] SPATH, D. (Hrsg.): Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013
- [SPJ+02] SEO, K.-K.; PARK, J.-H.; JANG, D.-S.; WALLACE, D.: Prediction of the life cycle cost using statistical and artificial neural network methods in conceptual product design. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 6, Number 6, Taylor & Francis Ltd, London, 2002, pp. 541-554
- [Spr14a-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort Nutzen. Version 10, unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/2440/nutzen-v10.html>, 22. Oktober 2014
- [Spr14b-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort Erlös. Version 11, unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54361/erloes-v11.html>, 22. Oktober 2014

- [Spr14c-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort Opportunitätskosten. Version 7, unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/6755/opportunitaetskosten-v7.html>, 22. Oktober 2014
- [SR03] SPENCER, C. M.; RHEE, S. J.: Cost Based Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Systems of Accelerator Magnets. In: Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, August 28<sup>th</sup>-31<sup>st</sup> 2007, Paris, 2007, pp. 1-10
- [SR88] SCHULZE, K.-P.; REHBERG, K.-J.: Entwurf von adaptiven Systemen – Eine Darstellung für Ingenieure. VEB Verlag Technik, Berlin, 1988
- [SS95] SIEGWART, H.; SENTI, R.: Product Life Cycle Management – Die Gestaltung eines integrierten Produktlebenszyklus. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1995
- [Sta73] STACHOWIAK, H.: Allgemeine Modelltheorie. Springer-Verlag, Wien, 1973
- [Ste07] STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007
- [Sto10] STOLL, K.: Planung und Konzipierung von Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 270, Paderborn, 2010
- [Str98] STRUBE, G.: Modelling Motivation and Action Control in Cognitive Systems. In: Schmid, U.; Krems, J. F.; Wysocki, F.: Mind Modelling. Pabst, Berlin, 1998, pp. 89-108
- [Suh93] SUHM, A.: Produktmodellierung in wissensbasierten Konstruktionssystemen auf Basis von Lösungsmustern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, Reihe Konstruktionstechnik, Verlag Shaker, Aachen, 1993
- [SW08] SCHIERENBECK, H.; WÖHLE, C. B.: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre. Oldenbourg Verlag, München, 17., völlig überarbeitete und aktualisierte Auflage, 2008
- [Tan89] TANAKA, M.: Cost Planning and Control Systems in the Design Phase of a new Product. In: Monden, Y.; Sakurai, M. (Hrsg.): Japanese Management Accounting: A World Class Approach to Profit Management. Productivity Press, Cambridge, 1989, pp. 49-71
- [Tho08] THOMMEN, J.-P.: Managementorientierte Betriebswirtschaftslehre. Versus Verlag, Zürich, 8. Auflage, 2008
- [TK08] TOUTENBURG, H.; KNÖFFEL, P.: Six Sigma – Methoden und Statistik für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [UP91] ULRICH, H.; PROBST, G. J. B.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln – Ein Brief vier für Führungskräfte. Verlag Paul Haupt, Stuttgart, 3. Auflage, 1991
- [Vaß14] VABHOLZ, M.: Evaluation of the Economic Efficiency. In: Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schaefer, W.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014, pp. 171-180
- [VDI11] VDI-GESELLSCHAFT PRODUKT- UND PROZESSGESTALTUNG (Hrsg.): Wertanalyse – das Tool im Value Management. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 5. Auflage, 2011
- [Ver13] VERBAND DER BAHNINDUSTRIE IN DEUTSCHLAND E.V. (Hrsg.): Die Bahnindustrie in Deutschland – Zahlen und Fakten zum Bahnmarkt und -verkehr. Ausgabe 2013, Berlin, 2013
- [VG12] VABHOLZ, M.; GAUSEMEIER, J.: Cost-Benefit-Analysis – Requirements for the Evaluation of Self-optimizing Systems. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> Joint International Symposium on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, July 2<sup>nd</sup>-4<sup>th</sup> 2012, Hannover, 2012, pp. 14-16
- [VG14] VASSHOLZ, M.; GRAESSLER, J.: Early Analysis of the System Dynamics of Self-optimizing Systems. In: Proceedings of the DESIGN 2014 13<sup>th</sup> International Design Conference, May 19<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> 2014, Dubrovnik, 2014, pp. 407-416

- [Wan11] WANG, M. H.: A Cost-based FMEA Decision Tool for Product Quality Design and Management. In: Proceedings of Intelligence and Security Informatics ISI 2011, July 10<sup>th</sup>-12<sup>th</sup> 2000, Beijing, 2011, pp. 297-302
- [WBH+96] WARNECKE, H. J.; BULLINGER, H.-J.; HICHERT, R.; VOEGELE, A.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, München, 3., überarbeitete Auflage, 1996
- [WDG14] WIEDERKEHR, O.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.: Der Entwicklungsauftrag als Basis für eine vorausschauende und systemorientierte Produktentwicklung. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering, Carl Hanser Verlag, München, 2014, S. 123-132
- [Weg69] WEGNER, G.: Systemanalyse und Sachmitteleinsatz in der Betriebsorganisation. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, 1969
- [Wei06] WEILKINS, T.: Systems Engineering mit SysML/UML – Modellierung, Analyse, Design. dpunkt.verlag, Heidelberg, 2006
- [Wöh13] WÖHE, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaft. Verlag Franz Vahlen, München, 25., überarbeitete und aktualisierte Auflage, 2013
- [Woo97] WOODRUFF, R. B.: Customer Value: The Next Source for Competitive Advantage. Journal of the Academy of Marketing Science, Volume 25, Number 2, 1997, pp. 139-153
- [Zan73] ZANGEMEISTER, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Ein Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Wittemannsche Buchhandlung A. u. M. Wittemann, München, 3. Auflage, 1973
- [Zir10] ZIRKLER, S., C.: Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Dr. Hut, München, 2010
- [Zol13] ZOLLONDZ, H.-D.: Grundlagen Lean Management – Einführung in Geschichte, Begriffe, Systeme, Techniken sowie Gestaltungs- und Implementierungsansätze eines modernen Managementparadigmas. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2013
- [Zwi89] ZWICKY, F.: Morphologische Forschung – Wesen und Wandel materieller und geistiger struktureller Zusammenhänge, Verlag Baeschlin, Glarus, 1989

## Normen und Richtlinien

- [DIN12973] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Value Management; Deutsche Fassung EN 12973:2000. DIN EN 12973, Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [DIN1325-1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Value Management, Wertanalyse, Funktionenanalyse, Wörterbuch – Teil 1: Wertanalyse und Funktionenanalyse; Deutsche Fassung EN 1325-1:1996. DIN EN 1325-1, Beuth Verlag, Berlin, 1996
- [DIN1325-2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Value Management, Wertanalyse, Funktionenanalyse, Wörterbuch – Teil 2: Value Management; Deutsche Fassung EN 1325-2:2004. DIN EN 1325-2, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [DIN13306] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN13306:2010. DIN EN 13306, Beuth Verlag, Berlin, 2010
- [DIN1421] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Gliederung und Benennung von Texten – Abschnitte, Absätze, Aufzählungen. DIN 1421, Beuth Verlag, Berlin, 1983
- [DIN16271] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Value Management – Funktionale Beschreibung der Bedürfnisse und funktionale Leistungsbeschreibung – Anforderungen an

das Beschreiben und Validieren der Bedürfnisse, die während der Erstellung oder des Erwerbs eines Produktes zu befriedigen sind; Deutsche Fassung EN 16271:2012. DIN EN 16271, Beuth Verlag, Berlin, 2013

- [DIN31051] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Grundlagen der Instandhaltung. Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [DIN60050] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): DIN IEC 60050-351 – Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351:Leittechnik. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [DIN60300] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004); Deutsche Fassung EN 60300-3-3:2004. DIN EN 60300-3-3, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [DIN60812] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlerzustandsart und -auswirkungsanalyse (FMEA) (IEC 60812:2006); Deutsche Fassung EN 60812:2006. DIN EN 60812, Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [DIN61025] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Fehlerzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2007); Deutsche Fassung EN 61025:2007. DIN EN 61025, Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Handbuch Konstruktion, VDI-Richtlinie 2206, Beuth-Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2221] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Handbuch Konstruktion, VDI-Richtlinie 2221, Beuth-Verlag, Berlin, 1993
- [VDI2225-3] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung. VDI-Handbuch Konstruktion, VDI-Richtlinie 2225, Blatt 3, Beuth-Verlag, Berlin, 1998
- [VDI2234] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur. VDI-Handbuch Konstruktion, VDI-Richtlinie 2234, Beuth-Verlag, Berlin, 1990
- [VDI2235] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren – Methoden und Hilfen. VDI-Handbuch Konstruktion, VDI-Richtlinie 2235, Beuth-Verlag, Berlin, 1987
- [VDI2800] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Wertanalyse. VDI-Handbuch Value-Management/Wertanalyse, VDI-Richtlinie 2800, Blatt 1, Beuth-Verlag, Berlin, 2010
- [VDI2803] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Funktionenanalyse – Grundlagen und Methode. VDI-Richtlinie 2803, Blatt 1, Beuth-Verlag, Berlin, 1996
- [VDI2807] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Teamarbeit – Anwendung in Wertanalyse-/Value-Management-Projekten. VDI-Handbuch Value-Management/Wertanalyse, VDI-Richtlinie 2807, Beuth-Verlag, Berlin, 2013
- [VDI2884] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing. VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 4, VDI-Richtlinie 2884, Beuth-Verlag, Berlin, 2005

## Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1 Kategorisierung Intelligenter Technischer Systeme.....	A-1
A2 Anlagen zur Entwicklungsaufgabe.....	A-5
A2.1 Trendanalyse .....	A-5
A2.2 Stakeholderanalyse .....	A-6
A2.3 Kundenbedürfnisse und -anforderungen .....	A-8
A3 Analyse der Verlässlichkeit.....	A-11
A4 Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells .....	A-14
A5 Plausibles Wirtschaftlichkeitsmodell für das RailCab .....	A-17





## A1 Kategorisierung Intelligenter Technischer Systeme

Zur Identifikation der Herausforderungen bei der Analyse Intelligenter Technischer Systeme werden die betrachteten Systeme zunächst gemäß Abschnitt 2.1.2 klassifiziert. Bei den in Abschnitt 2.2 betrachteten Systemen handelt sich um technische Systeme, die zu den künstlichen Systemen gehören [Hub84, S. 5]. Diese Systeme interagieren mit ihrem Umfeld und sind über Stoff-, Informations- und Energieflüsse mit diesem verbunden. Mechatronische (vgl. Abschnitt 2.2.1) und adaptive Systeme (vgl. Abschnitt 2.2.2) weisen adaptives Verhalten auf; ihre Anpassungsleistung basiert auf Kommunikations-, Interaktions- und Transformationsprozessen. Sie reagieren dabei auf Änderungen des zu regelnden Prozesses. Selbstoptimierende (vgl. Abschnitt 2.3) und Intelligente Technische Systeme (vgl. Abschnitt 2.2.3) zeichnen sich darüber hinaus dadurch aus, dass sie ihr Verhalten an sich ändernde Umgebungsbedingungen anpassen und lernfähig sind. Es handelt sich somit bei den betrachteten Systemen um offene Systeme. Die Eigenschaften der betrachteten Systeme ergeben sich aus den Eigenschaften ihrer Systemelemente sowie deren Zusammenwirken; die dynamischen Aspekte der Systeme überwiegen im Systembetrieb. Es handelt sich somit um dynamische Systeme. Autonome Mechatronische Systeme werden durch die Koppelung der Informationsverarbeitung zu vernetzten Mechatronischen Systemen (vgl. Abschnitt 2.2.1); es kann also von System of Systems gesprochen werden. Gleiches gilt für adaptive Systeme, die eine Erweiterung mechatronischer Systeme darstellen. Die Verknüpfung individueller selbstoptimierender Systeme bspw. in Form von Multi-Agenten-Systemen mit interagierenden OCM zu zusammengesetzten selbstoptimierenden Systemen führt ebenfalls zu System of Systems. Gleiches gilt für die Vernetzung Intelligenter Technischer Systeme über Informationsflüsse; durch ihre Vernetzung ergeben sich Cyber-Physical Systems [GTD13, S. 50].

Nach ULRICH und PROBST lassen sich Systeme hinsichtlich Kompliziertheit und Komplexität bewerten [UP91, S. 61]. Anhand dieser Kriterien lassen sich vier Kategorien unterscheiden: Einfaches System, beziehungsreich kompliziertes System, dynamisch kompliziertes System sowie komplexes System.

Für Intelligente Technische Systeme und selbstoptimierende Systeme ergibt sich die Herausforderung für ihre Analyse auf Basis ihrer Eigenschaften. Zum besseren Verständnis erfolgt daher die Kategorisierung der betrachteten Systeme im Portfolio (vgl. Bild A-1). In Anlehnung an [UP91, S. 61] und [Ban07, S. 93] wird auf der *Abzisse* die Kompliziertheit des Systems bewertet. Die Kompliziertheit wird durch die drei Bewertungskriterien Vielzahl, Vielfalt und Emergenz bestimmt. Tabelle A-1 zeigt den Bewertungsmaßstab für die drei Bewertungskriterien. Die Bewertungsskala reicht von 0 (wenig kompliziert) bis zu 3 (hoch kompliziert).

Tabelle A-1: Bewertungsmaßstab für die Kompliziertheit von Systemen auf der Abszisse

Kompliziertheit			Bewertungsmaßstab			
			0	1	2	3
Bewertungskriterien	1	<b>Vielzahl</b>	Wenige verschiedene Systemelemente	Einige verschiedene Systemelemente	Mehrere verschiedene Systemelemente	Viele verschiedene Systemelemente
	2	<b>Vielfalt</b>	Gleiche Beziehungen zwischen den Systemelementen	Überwiegend gleiche, einige unterschiedliche Beziehungen zwischen den Systemelementen	Mehrere unterschiedliche Beziehungen zwischen den Systemelementen	Viele unterschiedliche Beziehungen zwischen den Systemelementen
	3	<b>Emergenz</b>	Keine neuen Eigenschaften durch Zusammenwirken der Systemelemente	Einige neue Eigenschaften durch das Zusammenwirken der Systemelemente	Mehrere neue Eigenschaften durch das Zusammenwirken der Systemelemente	Viele neue Eigenschaften durch das Zusammenwirken der Systemelemente

Die Komplexität wird auf der *Ordinate* abgetragen. Komplexität wird durch die zwei Kriterien Dynamik und Veränderlichkeit bestimmt. Tabelle A-2 zeigt den Bewertungsmaßstab für die zwei Bewertungskriterien. Die Bewertungsskala reicht von 0 (wenig komplex) bis 3 (hoch komplex). Anhand dieser Bewertungskriterien lassen sich die betrachteten Systeme kategorisieren. Die Bewertung wird in Tabelle A-3 dargestellt und im Folgenden erläutert.

Tabelle A-2: Bewertungsmaßstab für die Komplexität von Systemen auf der Ordinate

Komplexität			Bewertungsmaßstab			
			0	1	2	3
Bewertungskriterien	1	<b>Dynamik</b>	Keine Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen den Systemelementen	Geringe Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen den Systemelementen	Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen den Systemelementen	Hohe Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen den Systemelementen
	2	<b>Veränderlichkeit</b>	Keine Veränderlichkeit im Zeitverlauf	Geringe Veränderlichkeit im Zeitverlauf	Veränderlichkeit im Zeitverlauf	Hohe Veränderlichkeit im Zeitverlauf

**Mechatronische Systeme** weisen neben der mechanischen Grundstruktur zudem Aktoren, Sensoren, eine Informationsverarbeitung sowie Schnittstellen zu seiner Umwelt auf [VDI2206, S. 14ff.]. Im Vergleich zu rein mechanischen Systemen weisen sie also mehrere verschiedene Systemelemente auf, die durch verschiedene Beziehungen miteinander verbunden sind. Die Systemeigenschaften gehen über die Eigenschaften der einzelnen Systemelemente aufgrund der integrierten Regelung hinaus und weisen daher emergente Eigenschaften auf (vgl. Abschnitt 2.1.2) [Hit07, S. 7]. Durch das synergetische Zusammenwirken verschiedener Technologien (aus den Bereich Elektronik, Softwaretechnik sowie Mechanik) in mechatronischen Systemen lassen sich neue Funktionen im Vergleich zu rein mechanischen Systemen realisieren [VDI2206, S. 10ff.]. Durch das Zusammenwirken der Systemelemente sind die Wirkungsverläufe untereinander veränderlich. Darüber hinaus weisen sie eine Veränderlichkeit im Zeitverlauf auf.

**Adaptive Systeme** sind darüber hinaus in der Lage, zwischen verschiedenen Reglern gemäß den Umgebungsbedingungen umzuschalten. Sie weisen somit eine höhere Emergenz als mechatronische Systeme auf. Weiterhin lässt sich die Regler eine höhere Dynamik als bei konventionellen mechatronischen Systemen realisieren (vgl. Abschnitt 2.2.2). Eine Einordnung adaptiver Systeme im Portfolio, hat somit höher als das konventionelle mechatronische System zu erfolgen.

*Tabelle A-3: Bewertung der Systeme hinsichtlich ihrer Kompliziertheit und Komplexität*

<b>Bewertungsmatrix</b> <b>Fragestellung:</b> Welche Bewertung erzielt das System I (Spalte) bezüglich des Kriteriums k (Zeile)?  <b>Bewertungsskala:</b> 0 bis 3  <b>Bewertungsmaßstab:</b> Gesonderten Tabellen zu entnehmen (siehe oben)	System	Mechatronisches System			Adaptives System		Intelligentes Technisches System		Selbstoptimierendes System	
<b>Bewertungskriterium</b>		G	B	BxG	B	BxG	B	BxG	B	BxG
Kompliziertheit										
Vielzahl	0,33	2	0,66	2	0,66	3	1	3	1	
Vielfalt	0,33	2	0,66	2	0,66	3	1	3	1	
Emergenz	0,33	2	0,66	3	1	3	1	3	1	
Summe	1	2		2,4		3		3		
Komplexität										
Dynamik	0,5	2	1	3	1,5	3	1,5	3	1,5	
Veränderlichkeit	0,5	2	1	2	1	3	1,5	3	1,5	
Summe	1	2		2,5		3		3		

**Intelligente Technische Systeme** und **Selbstoptimierende Systeme** verfügen über eine Vielzahl von Systemelementen. Diese geht über die Anzahl der Systemelemente mechatronischer sowie adaptiver Systeme hinaus, da u.a. die kognitiven Funktionen durch entsprechende Systemelemente zu realisieren sind (vgl. [Dum11, S. 101]). Die Verhaltensanpassung eines selbstoptimierenden Systems erfolgt unter anderem durch eine Strukturanpassung [ADG+09, S. 7]. Es existieren somit verschiedenste Beziehungen zwischen den Systemelementen, die zudem in der Lage sind sich im Betrieb zu verändern. Somit ist das System im Betrieb in der Lage neue Eigenschaften zu entwickeln, welche im Entwicklungsprozess nicht vorausgedacht wurden; es weist somit eine hohe Emergenz auf [Hit07, S. 7]. Diese Systeme weisen eine inhärente Teilintelligenz auf und sind somit in der Lage intelligentes Verhalten zu realisieren [ADG+09, S. 5]. Dieses intelligente Verhalten ist anders als bei mechatronischen und adaptiven Systemen durch unterschiedliche Reaktionen auf identische Reize gekennzeichnet [Hit07, S.43]. Diese Reaktionen werden durch den Selbstoptimierungsprozess angestoßen und durch das Operator-Controller-Modul realisiert (vgl. Abschnitt 2.3.3). Selbstoptimierende Systeme weisen somit eine hohe Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen den Systemelementen auf und verändern sich im Zeitverlauf sehr stark. Intelligente Technische Systeme und Selbstoptimierende

Systeme sind somit im Portfolio als hoch kompliziert und hoch komplex einzustufen. Sie werden im Rahmen der Arbeit synonym verwendet.

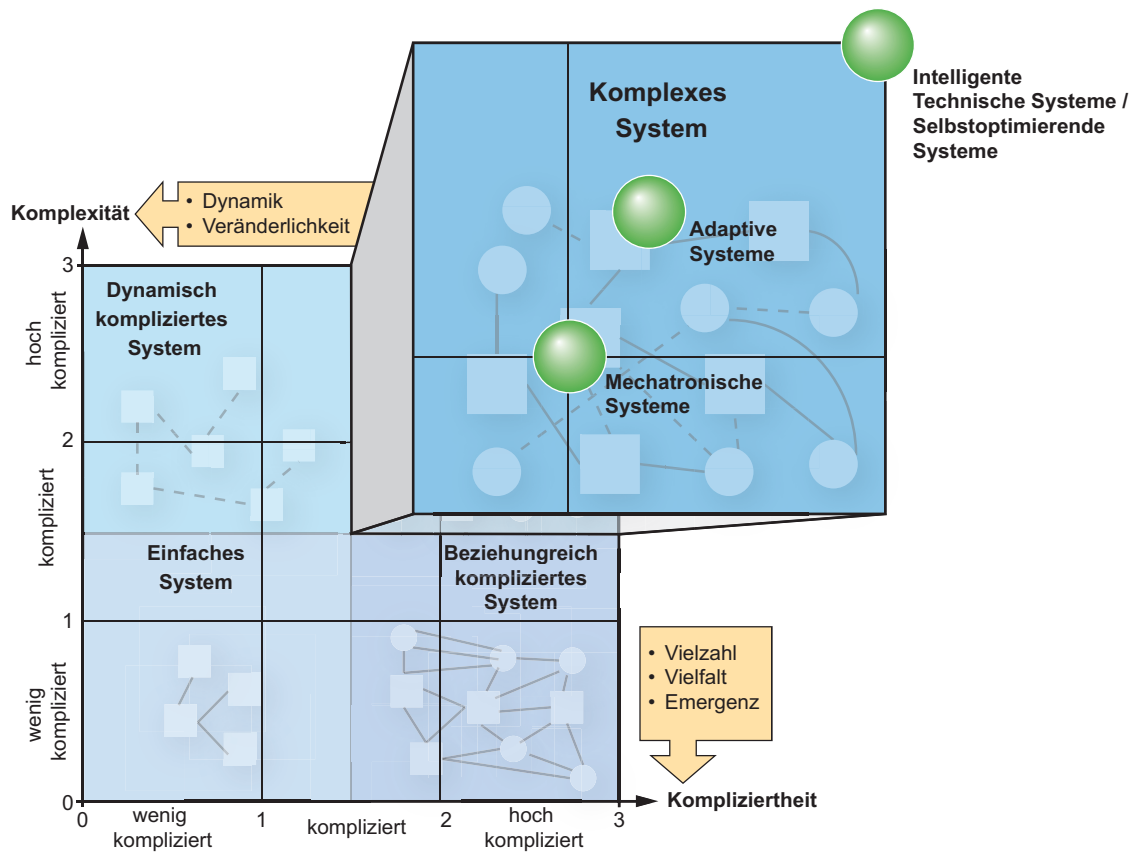


Bild A-1: Relative Einordnung der betrachteten Systeme hinsichtlich ihrer Kompliziertheit und Komplexität (in Anlehnung an [UP91, S. 61], [Ban07, S. 93])

## A2 Anlagen zur Entwicklungsaufgabe

### A2.1 Trendanalyse

Die Ergebnisse der Trendanalyse können in Anlehnung an PILKAHN in einem Trendradar konsolidiert werden [Pil07, S. 138ff.]. Bild A-2 zeigt den Trendradar für die Bahntechnik. Die 27 ausgewählten Trends werden als Kreis dargestellt. Der Durchmesser gibt Aufschluss über die Auswirkungen auf den Schienenverkehr; die Eintrittswahrscheinlichkeit wird durch die Nähe zum Zentrum des Radars abgebildet. Da es sich bei den dargestellten Trends nur um sehr relevante Trends handelt, wurde eine Achse mit dem Bewertungsmaßstab von hoch bis sehr hoch für die Eintrittswahrscheinlichkeit ausgewählt. Beispielsweise hat der Trend T2 „Weltweit wachsende Ballungsräume („Megacities“)" eine sehr hohe Eintrittswahrscheinlichkeit sowie hohe gesellschaftliche Auswirkungen auf den Schienenverkehr. Die Trends werden in Steckbriefform dokumentiert; diese Steckbriefe ergänzen die Entwicklungsaufgabe.

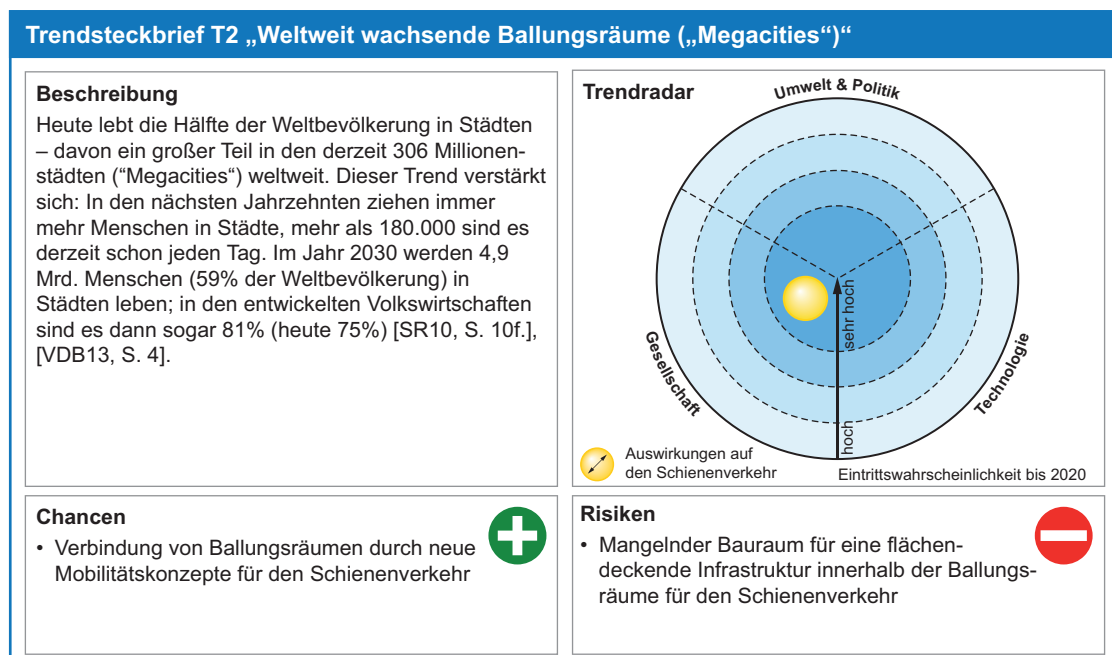
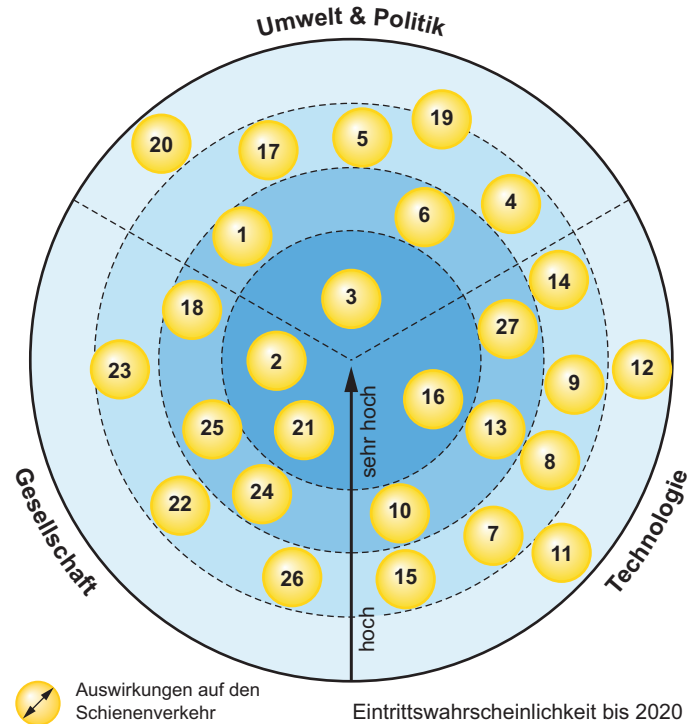


Bild A-2: Trendsteckbrief „Weltweit wachsende Ballungsräume („Megacities“)"



#### Trends

- |  |   |
|--|---|
| <b>T1</b> Steigende Umwelt- und Klimaschutzanforderungen         | <b>T15</b> Aktive Lärmreduktion                         |
| <b>T2</b> Weltweit wachsende Ballungsräume („Megacities“)        | <b>T16</b> Informations- und Telekommunikationslösungen |
| <b>T3</b> Globalisierung der Weltwirtschaft                      | <b>T17</b> Europäische Migrationskonzepte               |
| <b>T4</b> Liberalisierung und Deregulierung des Schienenverkehrs | <b>T18</b> Zunahme des Güterverkehrs                    |
| <b>T5</b> Interoperabilität des Schienenverkehrs in Europa       | <b>T19</b> Vereinfachte Zulassungsverfahren             |
| <b>T6</b> Steigende Treibstoffpreise und Ressourcenverknappung   | <b>T20</b> Sinkende Grenzwerte in der Luftreinhaltung   |
| <b>T7</b> Energieeffizienter Betrieb                             | <b>T21</b> Demografischer Wandel                        |
| <b>T8</b> Energieeffiziente Nebenaggregate                       | <b>T22</b> Entwicklung der Realeinkommen                |
| <b>T9</b> Hybridantriebe und Speichertechnologien                | <b>T23</b> Ganzheitliche Reise- und Transportketten     |
| <b>T10</b> Stationäre Energieversorgung                          | <b>T24</b> Zunehmende Flexibilisierung                  |
| <b>T11</b> Leichtbau-Entwicklung                                 | <b>T25</b> Zunehmende Individualisierung                |
| <b>T12</b> Emissionsminimierung bei Dieselmotoren                | <b>T26</b> Zuverlässigkeit der Verkehrsmittel           |
| <b>T13</b> Einsatz alternativer Kraftstoffe                      | <b>T27</b> Integration von inhärenter Intelligenz       |
| <b>T14</b> Oberleitungsloser Elektroantrieb                      |   |

Bild A-3: Trendradar Bahntechnik

## A2.2 Stakeholderanalyse

Die Ergebnisse der Stakeholderanalyse nach FINK und SIEBE lassen sich in einem Stakeholder-Radar aufbereiten und visualisieren [FS06, S. 180], [GP14, S. 151]. Im Validierungsbeispiel dienten bei der Stakeholderanalyse das *Marktumfeld* sowie das *globale Umfeld* des betrachteten Unternehmens „Neuen Bahntechnik Paderborn AG“ für das neue Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge als Suchfelder (vgl. Bild A-3). Insgesamt konnten 23 Stakeholder<sup>109</sup> identifiziert werden. Zu den Stakeholdern im Marktumfeld gehören neben den Mitarbeitern des Unternehmens auch die Reisenden im Personenverkehr oder

<sup>109</sup> Als Anhaltspunkt für die Stakeholder diente [DB13-ol].

die Betreibergesellschaft der Schienenfahrzeuge. Zum globalen Umfeld gehören Stakeholder wie Politik, Banken und Interessenverbände.

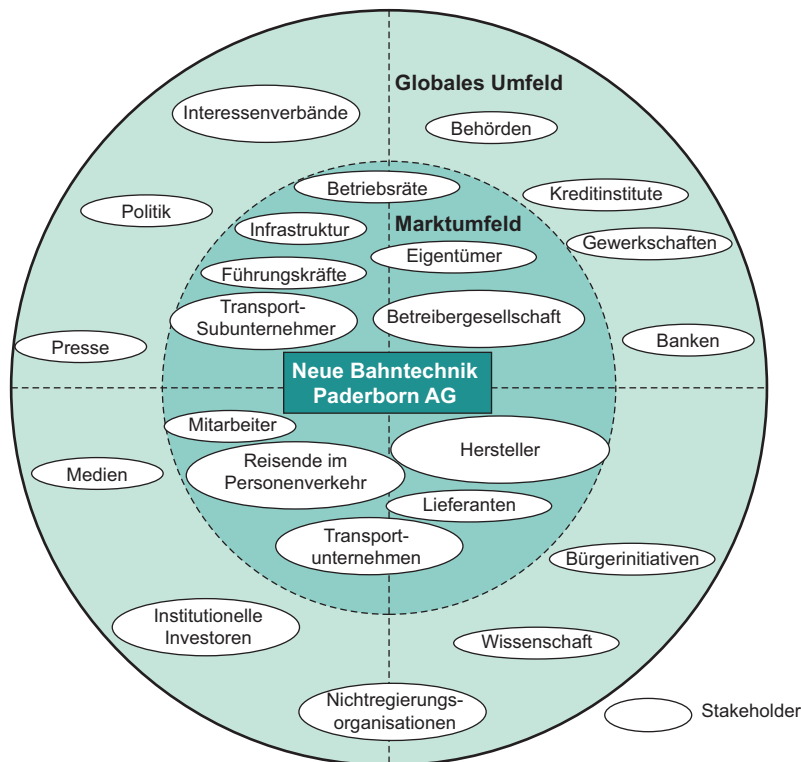


Bild A-4: Stakeholder-Radar für das neue Mobilitätskonzept für Schienenfahrzeuge

Die Stakeholder werden ebenfalls in Form von Steckbriefen dem Entwicklungsauftrag beigelegt. Bild A-5 zeigt exemplarisch den Stakeholdersteckbrief für „Reisende im Personenverkehr“.

Stakeholdersteckbrief S1 „Reisende im Personenverkehr“	
<p><b>Beschreibung</b></p> <p>Der Umfang des Personenverkehrs betrug 2011 2.883,4 Mrd. Personenkilometer (Pkm) weltweit. In Deutschland waren es insgesamt 1.084 Mrd. Pkm wovon 84,6 Mrd. Pkm (7,2%) auf den Nah- und Fernverkehr auf der Schiene fallen. Der Großteil (85%) der Reisenden im Personenverkehr greift derzeit auf den Individualverkehr (motorisierte Zweiräder, Personen- und Kombinationswagen) zurück, da dieser einen flexiblen und individuellen Transport ermöglicht [VDB13, S. 5]. Reisende nutzen den Schienenverkehr im Nahverkehr insbesondere auf dem Weg zur Arbeit; Langstrecken werden vermehrt bspw. für längere Urlaubsreisen über die Schiene abgewickelt. Privatreisende schätzen am Schienenverkehr insbesondere die Möglichkeit die Reisezeit sinnvoll für andere Tätigkeiten (bspw. lesen, entspannen, arbeiten) nutzen zu können. Verspätungen und Ausfälle führen bei den Reisenden eher zu Unmut.</p>	

Quelle: Fotolia (www.fotolia.de)

Bild A-5: Stakeholdersteckbrief „Reisende im Personenverkehr“

### A2.3 Kundenbedürfnisse und -anforderungen

Bei der Ermittlung der zukünftigen Kundenbedürfnisse wurde auf eine Studie des „*Münchener Kreis e.V.*“ zurückgegriffen, bei der eine internationale qualitative Nutzerbefragung durchgeführt wurde. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Durchdringung von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) in allen Lebensbereichen, wurden 7.278 Nutzer nach ihren zukünftigen Idealanforderungen an IKT-Lösungen und möglichen Einsatzmöglichkeiten für verschiedene Themenfelder aus Nutzersicht befragt. Für eine Beschreibung des konkreten Vorgehens bei der Ermittlung der Kundenbedürfnisse sei auf den Methodensteckbrief in [MED+13, S. 22ff.] verwiesen. Im Kontext des vorliegenden Validierungsbeispiels sind die ermittelten Kundenbedürfnismuster im Themenfeld „Mobilität“ relevant. Die 200 insgesamt ermittelten Nutzenaspekte wurden zu sechs Bedürfnismustern zusammengefasst [MED+13, S. 23]. Bild A-7 zeigt die Bedürfnismuster im Überblick, die das interpretatorische Ergebnis einer Faktorenanalyse sind. Die Darstellung zeigt eine „mentale“ Landkarte, wie sie auch bei den Sinus-Milieus<sup>110</sup> verwendet wird. Die Bedürfnismuster spannen sich zwischen den vier Polen „*Innovative Nutzungsmöglichkeiten*“, „*Flexible und spontane Nutzungsmöglichkeiten*“, „*Einfache und sorgenfreie Nutzungsmöglichkeiten*“ sowie „*Add-on Nutzungsmöglichkeiten auf*“. Hierbei sind gegenüberliegende Pole wertfrei zu betrachten, da sie sich nicht gegenseitig ausschließen. Die Cluster werden so positioniert, dass sie den Polen am nächsten sind die sie am treffendsten charakterisieren. Je größer der Durchmesser des Bedürfnismusters, desto relevanter ist es für die unterschiedlichen Mobilitätssituationen der Nutzer [MED+13, S. 136f.]. Die sechs Bedürfnismuster wurden in Steckbriefen dokumentiert. Diese enthalten neben einer Beschreibung, spezifische Anforderungsprofile für die jeweilige Mobilitätssituation. Darüber hinaus wurden sogenannte Kernbedürfnisse ermittelt, welche allen Bedürfnismustern gemein sind. Im Themenfeld Mobilität wurden die fünf Bedürfnisse „Ist komfortabel.“, „Ist stress- und sorgenfrei.“, „Ist sicher.“, „Funktioniert 100% zuverlässig.“, „Ich komme sicher an meiner Haustür an.“ als Kernbedürfnisse identifiziert [MED+13, S. 132f.].

---

<sup>110</sup> Die Sinus-Milieus des SINUS INSTITUTS basieren auf 100.000 Interviews, in denen die als relevant erachteten Bausteine der Lebenswelten, wie Normen, Werte und gesellschaftliche Stellung erfasst werden [KAS+07, S. 320f.], [AHH01, S. 79], [SI13-ol].



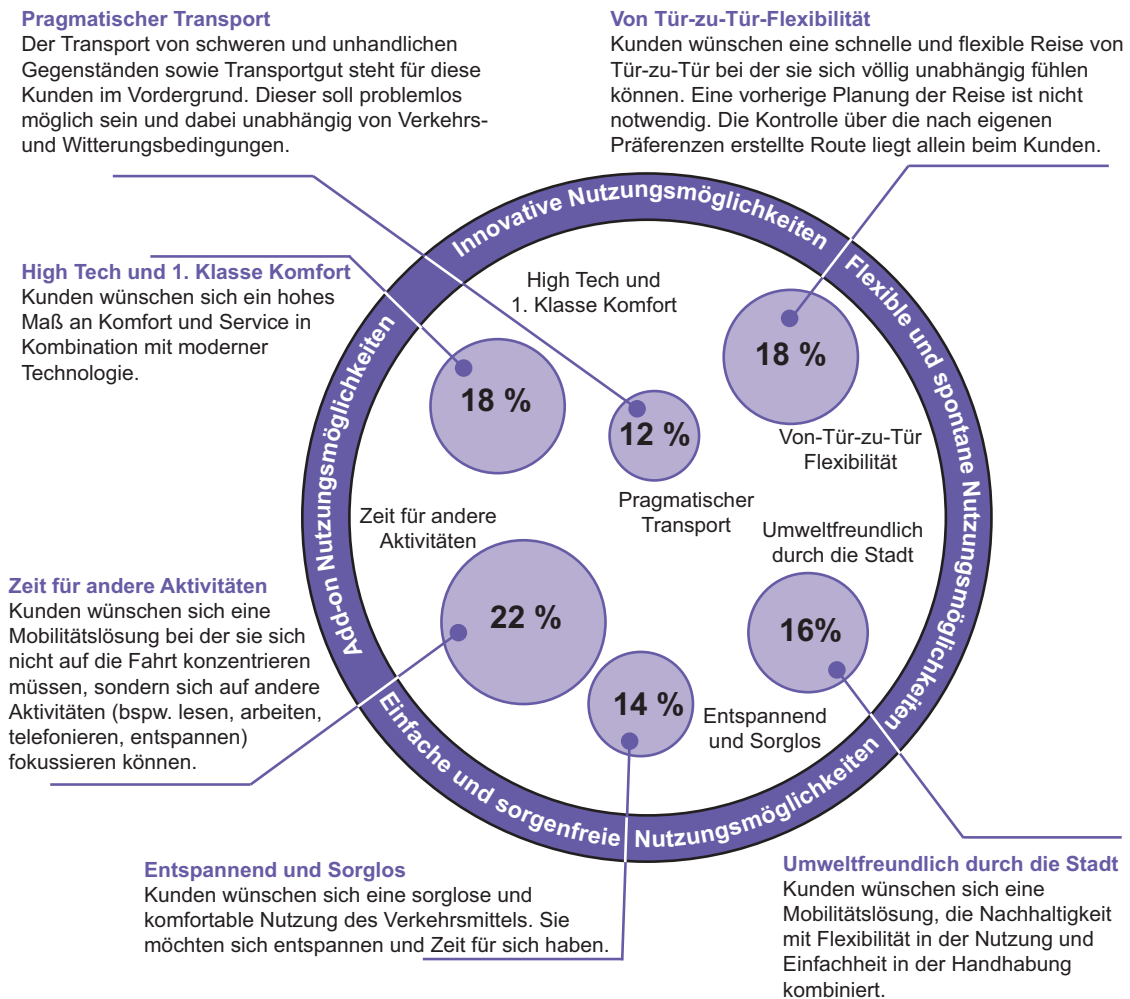


Bild A-6: Kundenbedürfnismuster Mobilität [MED+13, S. 136f.]

### Steckbrief Kundenbedürfnismuster „Zeit für andere Aktivitäten“

#### Kurzbeschreibung

Kunden wünschen sich eine Mobilitätslösung bei der sie sich nicht auf die Fahrt konzentrieren müssen, sondern sich auf andere Aktivitäten (bspw. lesen, arbeiten, telefonieren, entspannen) fokussieren können. Das Bedürfnismuster liegt vor allem bei sehr technologieaffinen Menschen vor. In 26 Prozent aller Mobilitätssituationen der 18-34-Jährigen wäre eine Lösung, die diese Anforderungen erfüllt ideal. Bei den 35-49-Jährigen trifft dies auf 23 Prozent und bei den über 50-Jährigen nur auf 15 Prozent der Situationen zu. Im Ländervergleich ist insbesondere in den asiatischen Ländern die Nachfrage nach einer Lösung für dieses Bedürfnismuster vorhanden. Die Umfrage hat gezeigt, dass erhebliches Gestaltungspotential bei der Erschließung der Anforderungen durch ein neues Mobilitätskonzept vorliegt. Bisherige Lösungen erfüllen das Anforderungsprofil aus Nutzersicht bisher nur unzureichend [MED+13, S. 137ff.].



Quelle: Fotolia (www.fotolia.de)

#### Anforderungsprofil

##### Unterhaltung und Aktivitäten

- Ich kann mich nebenbei unterhalten.
- Ich kann nebenbei Musik hören.
- Ich kann unterwegs Speisen und Getränke zu mir nehmen.
- Ich kann währenddessen produktiv arbeiten, als wäre ich an meinem Arbeitsplatz.
- Ich kann meine Zeit nutzen, um mich in meinen Sozialen Netzen / Communities online auszutauschen.
- Ich kann nebenbei lesen.
- Ich kann völlig ungestört telefonieren.

##### Komfort

- Ich kann mich ausruhen.
- Ich kann immer einen freien Sitzplatz finden.
- Ist klimatisiert.
- Ich muss mich nicht allzu sehr dabei konzentrieren.

##### Zeit und Freiraum

- Bietet mir die Möglichkeit, Zeit mit meinen Freunden und meiner Familie zu verbringen.
- Schenkt mir Zeit für mich selbst.
- Lässt mir Zeit, andere Menschen zu beobachten.

##### Schutz und Sorglosigkeit

- Bietet mir Schutz vor allen Witterungsbedingungen.
- Ich muss keine Angst vor Unfällen / Abstürzen haben.

[MED+13, S. 139]

Bild A-7: Kundenbedürfnismuster Mobilität [MED+13, S. 136f.]

### A3 Analyse der Verlässlichkeit

Für die Analyse der Verlässlichkeit Intelligenter Technischer Systeme wird der Risikowert  $r_i$  je Ausfall bestimmt. Hierzu werden die Auftretenswahrscheinlichkeit  $aw_i$ , die Entdeckungswahrscheinlichkeit  $ew_i$  sowie die Auswirkung  $as_i$  je Ausfall durch das interdisziplinäre Entwicklungsteam bewertet (vgl. Abschnitt 5.4). Der für die Bewertungsfaktoren verwendete Bewertungsmaßstab wird in den Tabellen A-4 bis A-6 dargestellt.

*Tabelle A-4: Bewertungsmaßstab für die Auftretenswahrscheinlichkeit  $aw_i$  der Ausfallart nach AIAG [DIN60812, S. 24], [Aut08]*

Auftrittenswahrscheinlichkeit			Bewertung		
			Beschreibung	Häufigkeit	Wahrscheinlichkeit
Bewertungsmaßstab	1	gering	Ausfall ist unwahrscheinlich.	$\leq 0,1$ pro tausend Systeme/Einheiten	$\leq 1 \cdot 10^{-5}$
	2	niedrig	Relativ wenige Ausfälle.	0,1 pro tausend Systeme/Einheiten	$1 \cdot 10^{-4}$
	3			0,5 pro tausend Systeme/Einheiten	$5 \cdot 10^{-4}$
	4	mittelmäßig	Gelegentliche Ausfälle.	1 pro tausend Systeme/Einheiten	$1 \cdot 10^{-3}$
	5			2 pro tausend Systeme/Einheiten	$2 \cdot 10^{-3}$
	6			5 pro tausend Systeme/Einheiten	$5 \cdot 10^{-3}$
	7	hoch	Wiederholte Ausfälle.	10 pro tausend Systeme/Einheiten	$1 \cdot 10^{-2}$
	8			20 pro tausend Systeme/Einheiten	$2 \cdot 10^{-2}$
	9	sehr hoch	Ausfall ist fast unvermeidbar.	50 pro tausend Systeme/Einheiten	$5 \cdot 10^{-2}$
	10			$\geq 100$ pro tausend Systeme/Einheiten	$\geq 1 \cdot 10^{-1}$

*Tabelle A-5: Entdeckungswahrscheinlichkeit  $ew_i$  des Ausfalls nach ALAG [DIN60812, S. 25], [Aut08]*

Entdeckungswahrscheinlichkeit			Bewertung
			Entdeckung zur Absicherung der Systemauslegung
Bewertungsmaßstab	1	fast sicher	Sehr hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion durch bewährtes Nachweisverfahren an Vorgängergeneration. Die Wirksamkeit der Entdeckungsmaßnahme wurde für dieses System(-element) nachgewiesen. Die Entdeckung ist fast sicher.
	2	sehr hoch	Hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion durch bewährtes Nachweisverfahren. Die Wirksamkeit der Entdeckungsmaßnahme wurde für dieses Produkt nachgewiesen. Die Aussichten für eine Entdeckung sind sehr gut.
	3	hoch	Hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion durch bewährtes Nachweisverfahren. Die Wirksamkeit der Entdeckungsmaßnahme wurde für dieses System(-element) nachgewiesen. Die Aussichten für eine Entdeckung sind gut.
	4	mäßig hoch	Mäßige Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion. Bewährtes Nachweisverfahren aus vergleichbarem System(-element) unter neuen Einsatz-/Randbedingungen. Die Aussichten für eine Entdeckung sind mäßig gut.
	5	mittelmäßig	Mäßige Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion. Bewährtes Nachweisverfahren aus vergleichbarem System(-element) unter neuen Einsatz-/Randbedingungen. Die Aussichten für eine Entdeckung sind mittelmäßig.
	6	niedrig	Niedrige Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion. Bewährtes Nachweisverfahren aus vergleichbarem System(-element) unter neuen Einsatz-/Randbedingungen. Die Aussichten für eine Entdeckung sind niedrig.
	7	sehr niedrig	Sehr niedrige Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion. Bewährtes Nachweisverfahren aus vergleichbarem System(-element) unter neuen Einsatz-/Randbedingungen. Die Aussichten für eine Entdeckung sind sehr niedrig.
	8	gering	Geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion, da Nachweisverfahren unsicher bzw. keine Erfahrung mit dem festgelegten Nachweisverfahren. Die Aussichten für eine Entdeckung sind gering.
	9	sehr gering	Sehr geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion, da kein Nachweisverfahren bekannt bzw. kein Nachweisverfahren festgelegt ist. Die Aussichten für eine Entdeckung sind sehr gering.
	10	völlig ungewiss	Entdeckung der Fehlfunktion ist völlig ungewiss, da kein Nachweisverfahren bekannt bzw. kein Nachweisverfahren festgelegt ist. Es gibt kaum Aussichten auf Entdeckung.

Tabelle A-6: Auswirkung  $as_i$  des Ausfalls in Anlehnung an [DIN60812, S. 25], [Aut08]

Auswirkung			Bewertung		
			Auswirkung der Ausfallart	Reaktion des Kunden	Auswirkung auf die Wartung- und Instandhaltung
Bewertungsmaßstab	1	keine	Keine erkennbare Auswirkung.	Kunde bemerkt Fehler nicht.	Fehler kann im Rahmen der geplanten Wartungszyklen behoben werden, ohne dass es der Kunde merkt.
	2	sehr gering	Systemelement erfüllt durch Ausfall die Anforderungen nicht.	Fehler wird von kritischen Kunden bemerkt (weniger als 25%).	Fehler kann im Rahmen der geplanten Wartungszyklen behoben werden, ohne dass es der 75% der Kunden merken.
	3	gering	Systemelement erfüllt durch Ausfall die Anforderungen nicht.	Fehler wird von 50% der Kunden bemerkt.	Fehler kann im Rahmen der geplanten Wartungszyklen behoben werden, ohne dass es der 50% der Kunden merken.
	4	sehr niedrig	Systemelement erfüllt durch Ausfall die Anforderungen nicht.	Fehler wird von den meisten Kunden bemerkt (weniger als 75%).	Fehler kann im Rahmen der geplanten Wartungszyklen behoben werden, ohne dass es der 25% der Kunden merken.
	5	niedrig	System betriebsbereit, aber nur mit reduziertem Leistungsniveau bspw. bzgl. Komfort/Bequemlichkeit einsetzbar.	Kunde etwas unzufrieden.	Fehler ist durch eine geplante Instandhaltung zu beheben.
	6	mittelmäßig	System betriebsbereit, aber nur mit eingeschränktem Leistungsniveau einsetzbar, bspw. ohne Komfort.	Kunde unzufrieden.	Fehler ist durch eine kurzfristige Instandhaltung zu beheben.
	7	hoch	System nur auf stark eingeschränktem Leistungsniveau einsetzbar.	Kunde sehr unzufrieden. Der Kunde kann ggf. Gewährleistungsansprüche geltend machen.	Fehler ist umgehend durch Instandhaltung zu beheben.
	8	sehr hoch	System nicht betriebsbereit (Verlust der Hauptfunktion).	Stillstandszeiten und die damit verbundenen monetären Verluste etc. senken die Kundenzufriedenheit stark. Der Kunde kann Gewährleistungsansprüche geltend machen.	Fehler ist umgehend durch Instandhaltung zu beheben. Ggf. ist ein System als Ersatz bereitzustellen, um die Stillstandszeiten zu minimieren.
	9	gefährlich, mit Warnung	Sehr hoher Rang für Schwere, wenn eine mögliche Ausfallart die sichere Funktion des Systems beeinträchtigt und/oder die Nichterfüllung gesetzlicher Auflagen Konsequenzen mit Warnung nach sich zieht.	Es kann ggf. zum Verlust von Menschenleben kommen. Kunde kann Haftungsansprüche geltend machen. Das Verhältnis zum Kunden kann nachhaltig gestört werden.	Fehler ist umgehend durch Instandhaltung zu beheben. Rückrufaktionen können notwendig sein, was einen hohen Verlust des Image für das Unternehmen mit sich zieht.
	10	gefährlich, ohne Warnung	Sehr hoher Rang für Schwere, wenn eine mögliche Ausfallart die sichere Funktion des Systems beeinträchtigt und/oder die Nichterfüllung gesetzlicher Auflagen Konsequenzen ohne Warnung nach sich zieht.	Es kann ggf. zum Verlust von Menschenleben kommen. Kunde kann Haftungsansprüche geltend machen. Das Verhältnis zum Kunden kann nachhaltig gestört werden.	Fehler ist umgehend durch Instandhaltung zu beheben. Rückrufaktionen sind notwendig, hoher Verlust des Image des Unternehmens ist zu erwarten.

## A4 Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells

Zur Überprüfung der Plausibilität des Wirtschaftlichkeitsmodells dient die im Folgenden dargestellte Checkliste in den Tabellen A-7 bis A-9. Das Vorgehen bei der Plausibilitätsprüfung ist in Abschnitt 5.6.1 beschrieben.

*Tabelle A-7: Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells Teil 1*

Nr.	Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells - Teil 1	Ja /Nein
<b>1</b>	<b>Vergleichbarkeit</b>	
1.1	Ist jedes Kosten- und Nutzelement einer Klasse zugeordnet?	
1.2	Sind alle Kostenelemente deren Entstehung von einer Funktion des Intelligenten Technischen Systems abhängen als «funktionsabhängig» klassifiziert?	
1.3	Sind alle Kostenelemente deren Entstehung vom Gesamtsystem abhängen als «gesamtsystemabhängig» klassifiziert?	
1.4	Sind alle Kostenelemente deren Entstehung von der Betriebssituation des Intelligenten Technischen Systems abhängen als «situationsabhängig» klassifiziert?	
1.5	Sind alle Nutzelemente, die vom Kunden auf Basis einer Funktion des Intelligenten Technischen Systems bewertet werden, als «funktionsabhängig» klassifiziert?	
1.6	Sind alle Nutzelemente, die vom Kunden auf Basis des gesamten Intelligenten Technischen Systems bewertet werden, als «gesamtsystemabhängig» klassifiziert?	
1.7	Sind alle Nutzelemente, die vom Kunden in jeder Betriebssituation erneut bewertet werden, als «situationsabhängig» klassifiziert?	
<b>2</b>	<b>Vollständigkeit (1/3)</b>	
2.1	Wurden alle Elemente benannt?	
2.2	Wurden alle Beziehungen benannt?	
2.3	Wurde ein projektweites Glossar erstellt?	
2.4	Enthält das Glossar mindestens die Abkürzung und die entsprechend ausgeschriebene Elementbezeichnungen?	
2.5	Wurden die Kostenelemente so benannt, dass sie dem Kostenträger eindeutig zugewiesen werden können?	
2.6	Wurden die Nutzelemente so benannt, dass sie dem Nutzenträger eindeutig zugewiesen werden können?	
2.7	Wurden die Wirtschaftlichkeitsselemente so benannt, dass der Bezug zu den in das Verhältnis gesetzten Kosten- und Nutzelementen eindeutig ist?	
2.8	Sind Stakeholderelemente nach dem Stakeholder benannt, den sie repräsentieren?	
2.9	Sind die Multiplikatoren nach dem Sachverhalt benannt, den sie repräsentieren?	
2.10	Sind die logischen Beziehungen, die ein Stakeholderelement mit einem Kostenelement verbinden, mit „entsteht“ benannt?	
2.11	Sind die logischen Beziehungen, die ein Stakeholderelement mit einem Nutzelement verbinden, mit „zieht“ benannt?	
2.12	Sind die logischen Beziehungen, die ein Stakeholderelement mit einem Wirtschaftlichkeitsselement verbinden, mit „resultiert für“ benannt?	
2.13	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Lebenszykluskosten</i> ?	
2.14	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Anschaffungskosten</i> ?	
2.15	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Inbetriebnahmekosten</i> ?	
2.16	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Betriebskosten</i> ?	
2.17	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Instandhaltungskosten</i> ?	
2.18	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Entsorgungskosten</i> ?	

Tabelle A-8: Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells Teil 2

Nr.	Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells - Teil 2	Ja /Nein
<b>2</b>	<b>Vollständigkeit (2/3)</b>	
2.19	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Selbstkosten</i> ?	
2.20	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Entwicklungskosten</i> ?	
2.21	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Investitionskosten</i> ?	
2.22	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Herstellkosten</i> ?	
2.23	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>Vertriebskosten</i> ?	
2.24	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Kostenelement mit der Bezeichnung <i>sonstige Kosten</i> ?	
2.25	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>Zielgewinn</i> ?	
2.26	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>Unternehmenswert</i> oder vergleichbar?	
2.27	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>externer Nutzen</i> ?	
2.28	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>interner Nutzen</i> oder vergleichbar?	
2.29	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>Unternehmensnutzen</i> oder vergleichbar?	
2.30	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>Synergieeffekt</i> oder vergleichbar?	
2.31	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>Einstellung</i> oder vergleichbar?	
2.32	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>situationsabhängiger Nutzen</i> oder vergleichbar?	
2.33	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>subjektiver Kundennutzen</i> ?	
2.34	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>objektiver Kundennutzen</i> ?	
2.35	Enthält das Wirtschaftlichkeitsmodell mindestens ein Nutzelement mit der Bezeichnung <i>Attribute</i> ?	
2.36	Ist jedem Kostenelement ein Kostenwert als Eigenschaft zuzuweisen?	
2.37	Ist jedem Nutzelement ein erwarteter Nutzwert als Eigenschaft zugewiesen?	
2.38	Ist jedem Nutzelement ein erlebter Nutzwert als Eigenschaft zugewiesen?	
2.39	Ist jedem Nutzelement eine Kano-Kategorie als Eigenschaft zugewiesen?	
2.40	Ist jedem Wirtschaftlichkeitselement ein Wert als Eigenschaft zugewiesen?	
2.41	Entspricht der Wert für die Wirtschaftlichkeit dem Quotienten der mittels der Verhältnisbeziehung verbundenen Nutzen- und Kostenelemente?	
2.42	Hat jedes Stakeholderelement mindesten eine logische Beziehung zu einem Kostenelement?	
2.43	Hat jedes Stakeholderelement mindesten eine logische Beziehung zu einem Nutzelement?	
2.44	Hat jedes Stakeholderelement mindesten eine logische Beziehung zu einem Wirtschaftlichkeitselement?	
2.45	Ein Stakeholderelement, das durch eine logische Beziehung mit einem Kosten- oder Nutzelement verbunden ist, ist auch mit dessen aggregierten Elementen verbunden. Ist die Zuordnung auf der unteren Ebene ebenfalls korrekt?	
2.46	Ist jedem Multiplikator ein Wert als Eigenschaft zugewiesen?	
2.47	Ist jeder Aggregationsbeziehung ein Gewichtungsfaktor zugeordnet?	
2.48	Ist jeder verstärkenden Beziehung ein Verstärkungsfaktor oder eine -funktion zugewiesen?	
2.49	Ist die Art der Veränderung bei einer verstärkenden Beziehung durch ein „+“ für steigen spezifiziert?	

Tabelle A-9: Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells Teil 3

Nr.	Checkliste zur Plausibilitätsprüfung des Wirtschaftlichkeitsmodells - Teil 3	Ja /Nein
<b>2</b>	<b>Vollständigkeit (3/3)</b>	
2.50	Ist die Art der Veränderung bei einer verstärkenden Beziehung durch ein „-“ für sinkend spezifiziert?	
2.51	Wurde die Veränderung eines Elements bei einer verstärkenden Beziehung durch Nebenbedingungen, wo notwendig, genauer spezifiziert?	
2.52	Ist jeder dämpfenden Beziehung ein Dämpfungsfaktor oder eine -funktion zugewiesen?	
2.53	Ist die Art der Veränderung bei einer dämpfenden Beziehung durch ein „+“ für steigen spezifiziert?	
2.54	Ist die Art der Veränderung bei einer dämpfenden Beziehung durch ein „-“ für sinkend spezifiziert?	
2.55	Wurde die Veränderung eines Elements bei einer dämpfenden Beziehung durch Nebenbedingungen, wo notwendig, genauer spezifiziert?	
<b>3</b>	<b>Richtigkeit</b>	
3.1	Sind jedem Kostenelement kein oder mindestens zwei Elemente durch eine Aggregationsbeziehung zugewiesen?	
3.2	Sind jedem Nutzelement kein oder mindestens zwei Elemente durch eine Aggregationsbeziehung zugewiesen?	
3.3	Zeigt die schwarze Raute einer Aggregationsbeziehung auf das Element, welches die Elemente auf der unteren Hierarchieebene zusammenfasst?	
3.4	Haben die Gewichtungsfaktoren der Aggregationsbeziehung einen Wert zwischen 0 und 100 Prozent?	
3.5	Ist die Summe der Gewichtungsfaktoren auf einer Hierarchieebene immer 100 Prozent?	
3.6	Entspricht der Wert eines Kostenelements auf der oberen Hierarchieebene der Summe aus dem Produkt der aggregierten Kostenelemente und deren Gewichtungsfaktoren?	
3.7	Entspricht der Wert eines Nutzelements auf der oberen Hierarchieebene der Summe aus dem Produkt der aggregierten Nutzelemente und deren Gewichtungsfaktoren?	
3.8	Sind jedem Wirtschaftlichkeitselement mindestens ein Kosten- und ein Nutzelement durch eine Verhältnisbeziehung zugewiesen?	
3.9	Zeigt die zweigeteilte Raute einer Verhältnisbeziehung auf das Wirtschaftlichkeitselement?	
3.10	Entspricht der Wert des Wirtschaftlichkeitselements dem Wert des Quotienten der mittels einer Verhältnisbeziehung verbundenen Nutzen- und Kostenelemente?	
3.11	Zeigt die Raute einer dämpfenden Beziehung auf das Element, welches durch eine Veränderung des verbundenen Elements gedämpft wird?	
3.12	Zeigt die Raute einer verstärkenden Beziehung auf das Element, welches durch eine Veränderung des verbundenen Elements verstärkt wird?	
3.13	Hat jeder Multiplikator mindestens eine verstärkende oder dämpfende Beziehung mit einem Element des Wirtschaftlichkeitsmodells?	
3.14	Zeigt die Raute der verstärkenden oder dämpfenden Beziehung eines Multiplikators auf das Element, welches vom Multiplikator beeinflusst wird?	
3.15	Hat jedes Stakeholderelement eine logische Beziehung zu einem Kosten-, Nutzen- oder Stakeholderelement?	
3.16	Zeigt die Pfeilspitze der logischen Beziehung auf das verbundene Kosten-, Nutzen- oder Stakeholderelement?	

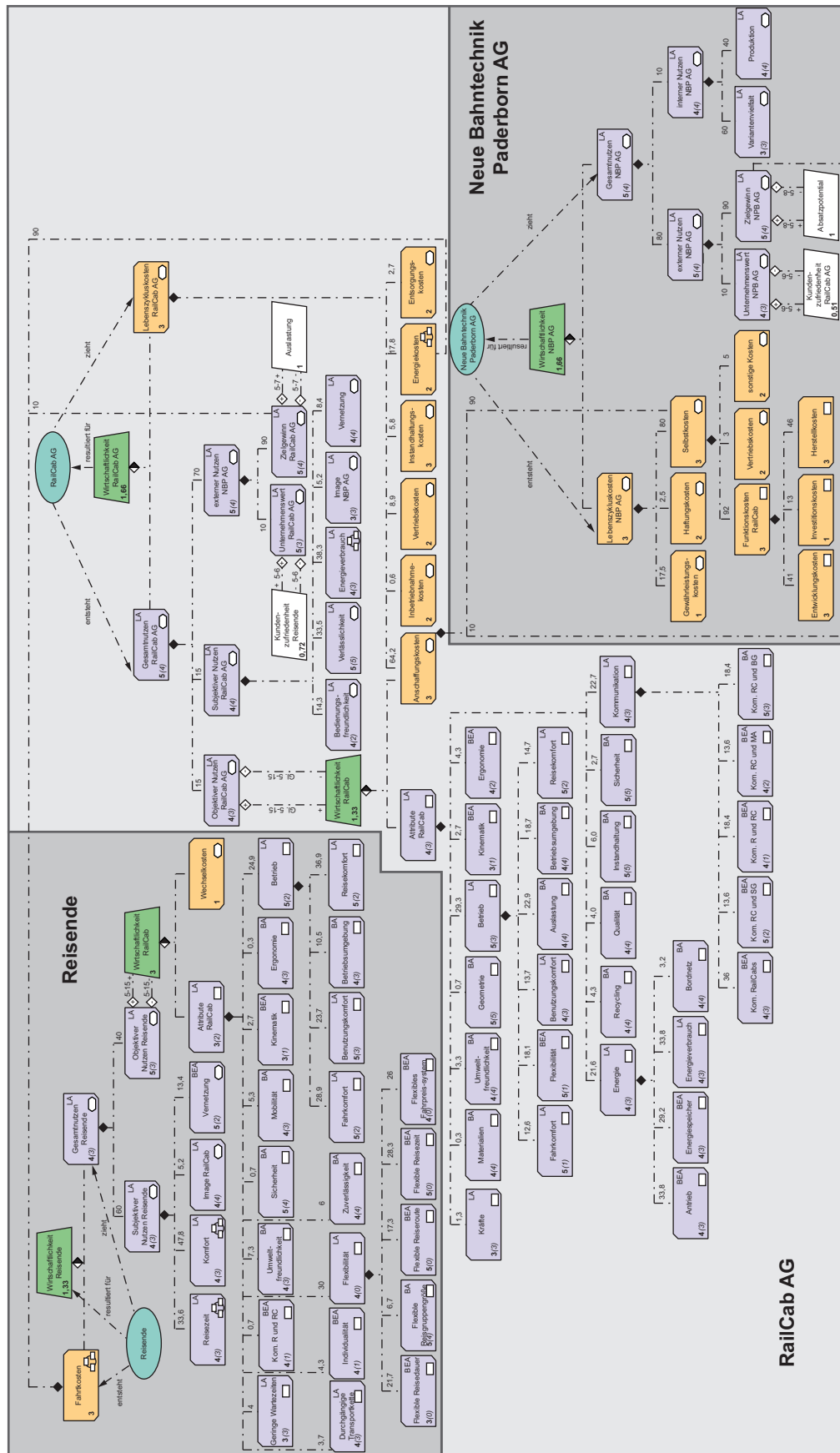


## A5 Plausibles Wirtschaftlichkeitsmodell für das RailCab

Im Folgenden wird das in Kapitel 5 entwickelte und bewertete plausible Wirtschaftlichkeitsmodell für das Validierungsbeispiel RailCab dargestellt. Das Glossar in Tabelle A-10 umfasst die im Wirtschaftlichkeitsmodell verwendeten Abkürzungen für ein einheitliches Verständnis des Modells sowohl beim Modellersteller als auch beim Modellnutzer. Das gesamte Wirtschaftlichkeitsmodell wird in Bild A-8 im Überblick dargestellt. Bild A-9 zeigt den Ausschnitt für die Neue Bahntechnik Paderborn AG. Die Wirtschaftlichkeit, welche für die RailCab AG resultiert wird in Bild A-10 und A-11 dargestellt. Die Wirtschaftlichkeit für den Stakeholder *Reisende* wird in Bild A-12 gezeigt.

*Tabelle A-10: Glossar zum Wirtschaftlichkeitsmodell*

Glossar zum Wirtschaftlichkeitsmodell	
Abkürzung	Bedeutung
A	Auslastung
AP	Absatzpotential
BA	Basisattribut
BEA	Begeisterungsattribut
BG	Betreibergesellschaft
e	erwartete Nutzen
GF	Gewichtungsfaktor
Gl.	Gleichung
k	Kosten
K	Kano-Kategorie
Kom.	Kommunikation
LA	Leistungsattribut
m	Multiplikator
MA	Mobilitätsassistent
n	erlebte Nutzen
NBP AG	Neue Bahntechnik Paderborn AG
RC	RailCab
SG	Smart Grid
w	Wirtschaftlichkeit
Z	Kundenzufriedenheit



*Bild A-8: Plausibles Wirtschaftlichkeitsmodell für das Schienenfahrzeug RailCab*

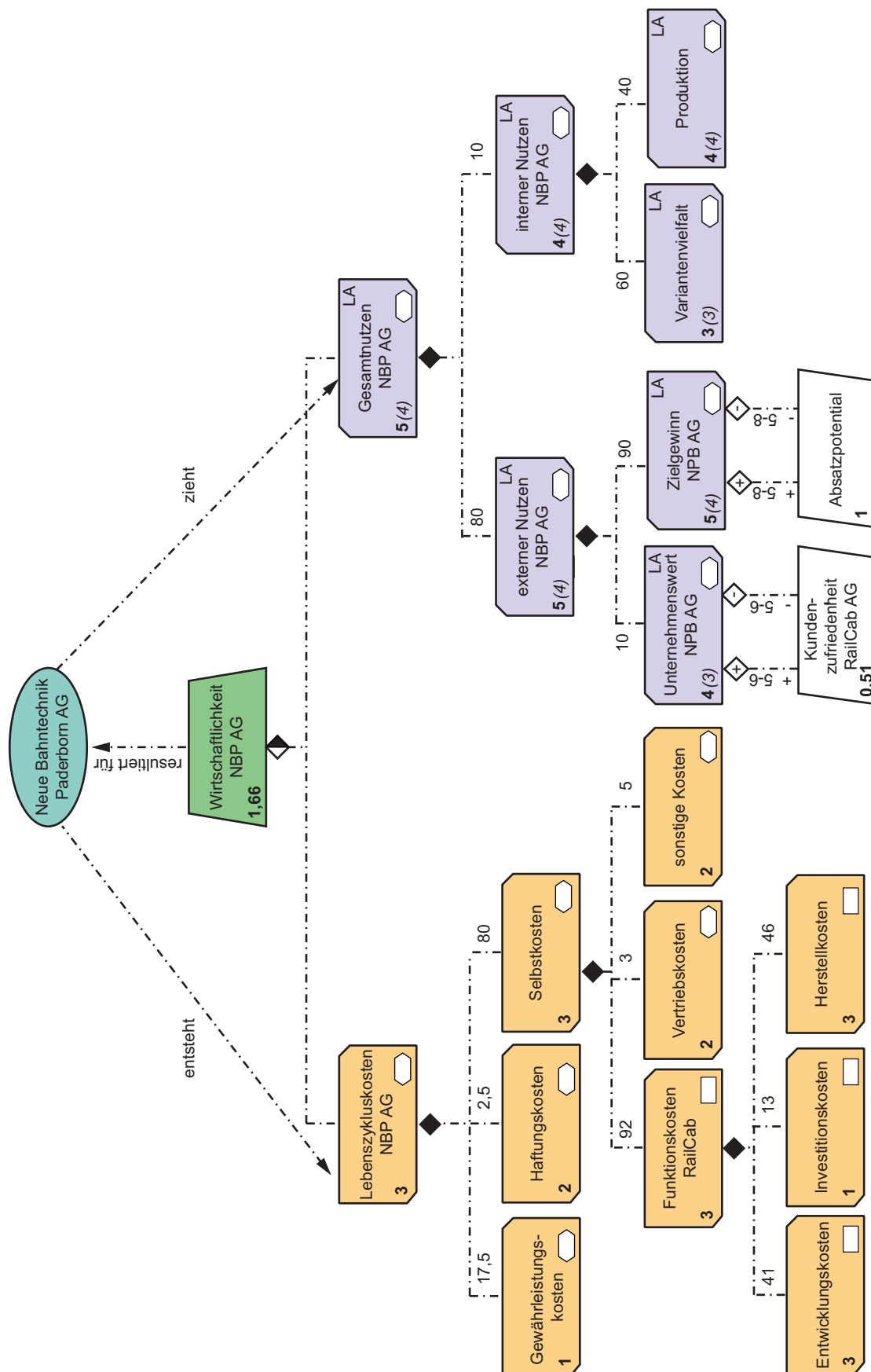
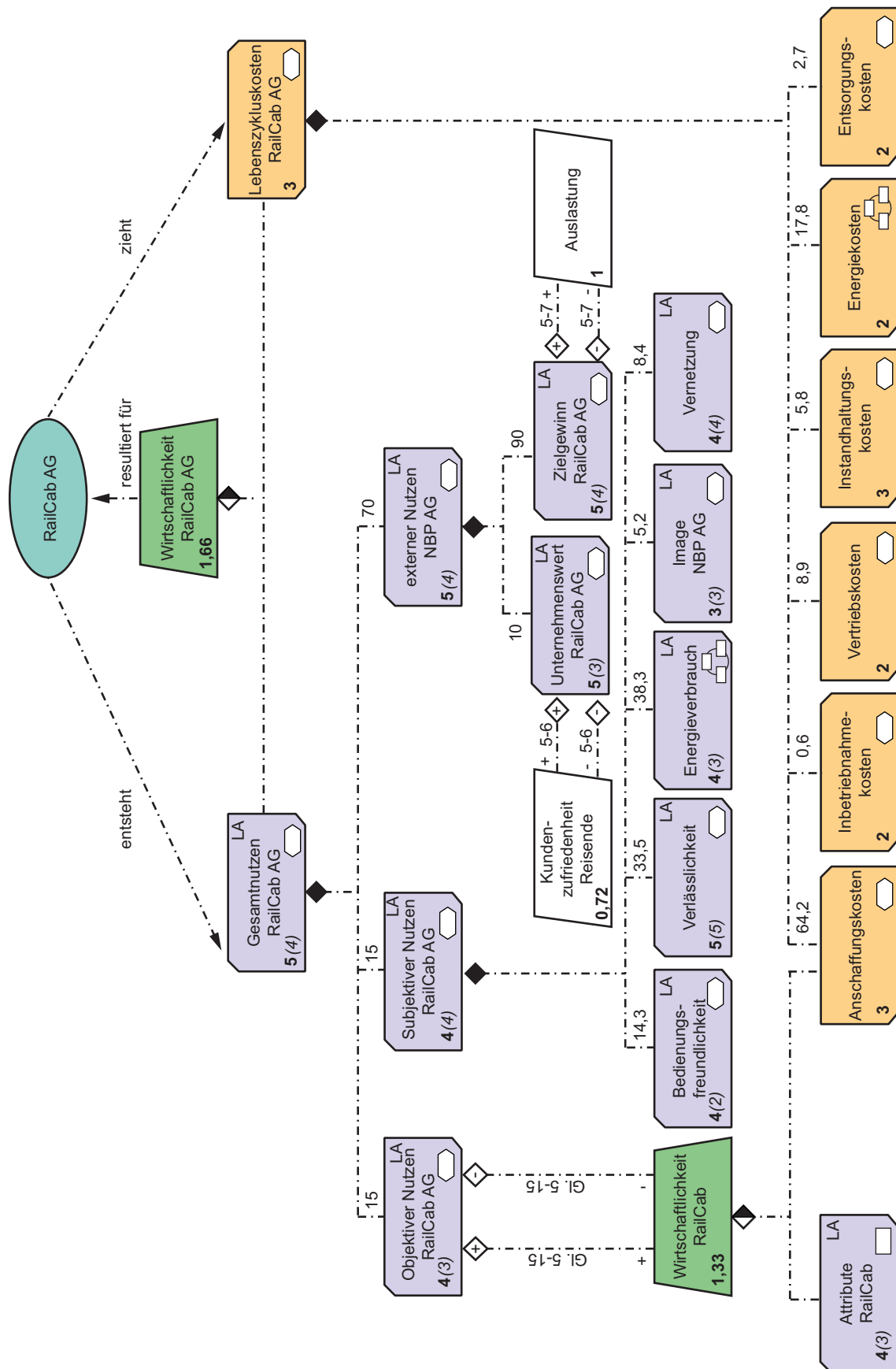


Bild A-9: Wirtschaftlichkeitsmodell für die Neue Bahntechnik Paderborn AG



*Bild A-10: Wirtschaftlichkeitsmodell für die RailCab AG (Teil 1)*

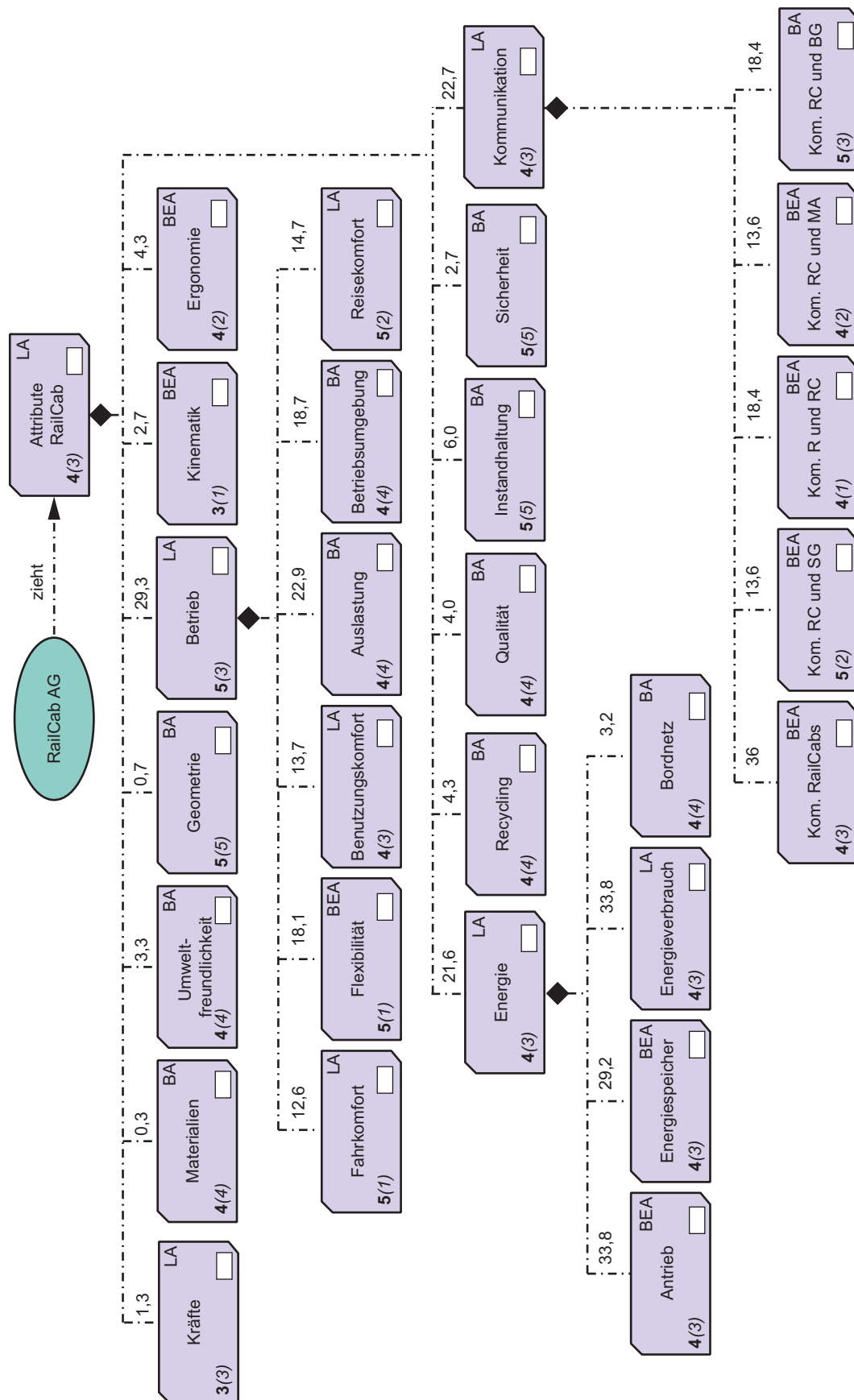


Bild A-11: Wirtschaftlichkeitsmodell für die RailCab AG (Teil 2)

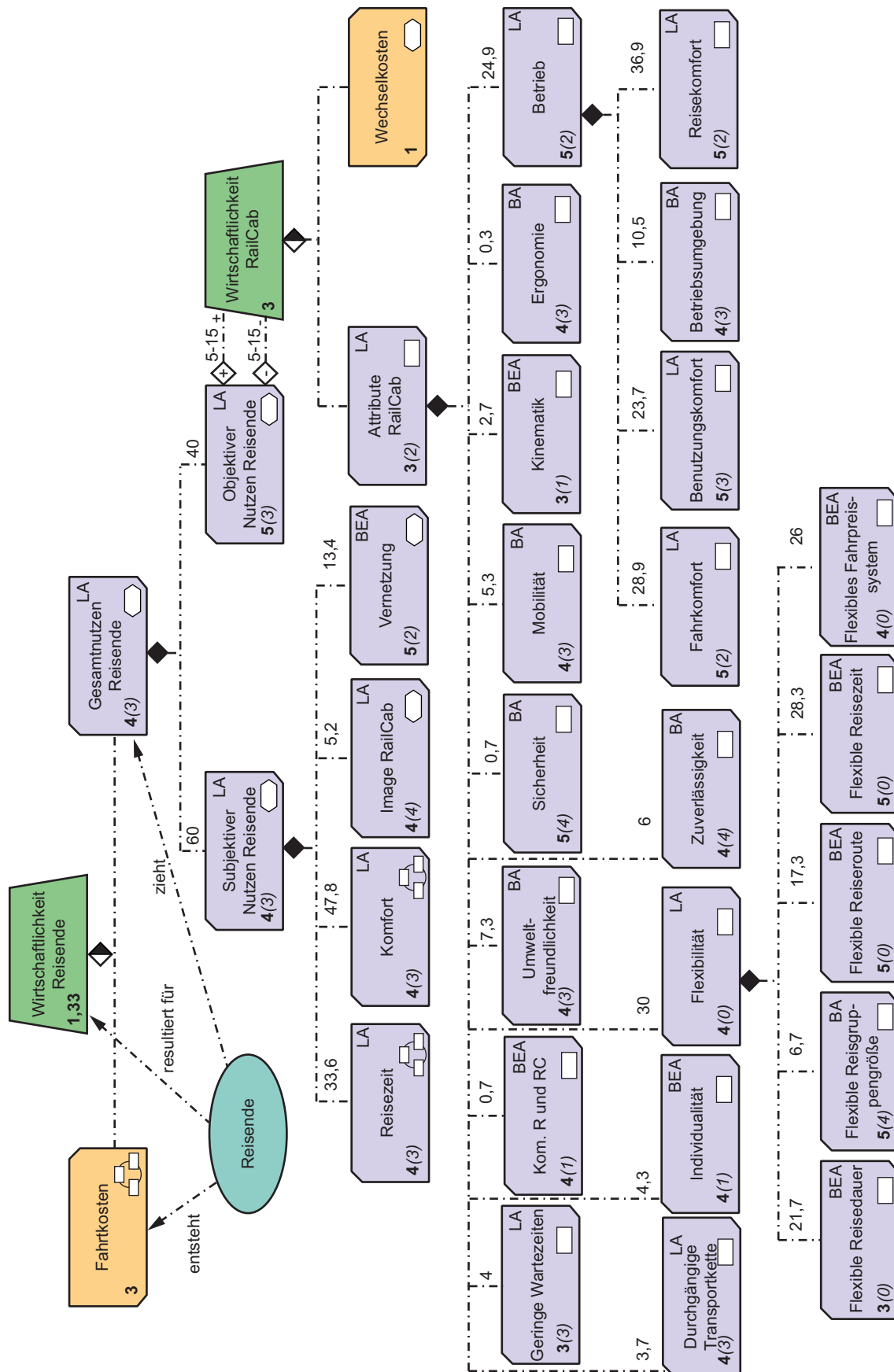


Bild A-12: Wirtschaftlichkeit des RailCabs für den Reisenden



## **Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik**

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

## **Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology**

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: En-route to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today eight Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.





## Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- |  |  |
|--|--|
| <p>Bd. 316 DANGELMAIER, W.; KLAAS, A.; LAROQUE, C.: Simulation in Produktion und Logistik 2013. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 316, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-35-9</p> <p>Bd. 317 PRIESTERJAHN, C.: Analyzing Self-healing Operations in Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 317, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-36-6</p> <p>Bd. 318 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 9. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 5. und 6. Dezember 2013, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 318, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-37-3</p> <p>Bd. 319 GAUSEMEIER, S.: Ein Fahrerassistenzsystem zur prädiktiven Planung energie- und zeitoptimaler Geschwindigkeitsprofile mittels Mehrzieloptimierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 319, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-38-0</p> <p>Bd. 320 GEISLER, J.: Selbstoptimierende Spurführung für ein neuartiges Schienenfahrzeug. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 320, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-39-7</p> <p>Bd. 321 MÜNCH, E.: Selbstoptimierung verteilter mechatronischer Systeme auf Basis paretooptimaler Systemkonfigurationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 321, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-40-3</p> <p>Bd. 322 RENKEN, H.: Acceleration of Material Flow Simulations - Using Model Coarsening by Token Sampling and Online Error Estimation and Accumulation Controlling. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 322, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-41-0</p> <p>Bd. 323 KAGANOVA, E.: Robust solution to the CLSP and the DLSP with uncertain demand and online information base. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 323,</p> | <p>Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-42-7</p> <p>Bd. 324 LEHNER, M.: Verfahren zur Entwicklung geschäftsmodell-orientierter Diversifikationsstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 324, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-43-4</p> <p>Bd. 325 BRANDIS, R.: Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 325, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-44-1</p> <p>Bd. 326 KÖSTER, O.: Systematik zur Entwicklung von Geschäftsmodellen in der Produktentstehung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 326, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-45-8</p> <p>Bd. 327 KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstrukturen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-46-5</p> <p>Bd. 328 KRÜGER, M.: Parametrische Modellordnungsreduktion für hierarchische selbstoptimierende Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 328, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-47-2</p> <p>Bd. 329 AMELUNXEN, H.: Fahrdynamikmodelle für Echtzeitsimulationen im komfortrelevanten Frequenzbereich. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 329, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-48-9</p> <p>Bd. 330 KEIL, R.; SELKE, H. (Hrsg.): 20 Jahre Lernen mit dem World Wide Web. Technik und Bildung im Dialog. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 330, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-49-6</p> |
|--|--|

## Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 331 HARTMANN, P.: Ein Beitrag zur Verhaltensantizipation und -regelung kognitiver mechatronischer Systeme bei langfristiger Planung und Ausführung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 331, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-50-2
- Bd. 332 ECHTERHOFF, N.: Systematik zur Planung von Cross-Industry-Innovationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 332, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-51-9
- Bd. 333 HASSAN, B.: A Design Framework for Developing a Reconfigurable Driving Simulator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 333, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-52-6
- Bd. 334 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 10. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 20. und 21. November 2014, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 334, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-53-3
- Bd. 335 RIEKE, J.: Model Consistency Management for Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 335, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-54-0
- Bd. 336 HAGENKÖTTER, S.: Adaptive prozessintegrierte Qualitätsüberwachung von Ultraschalldrahtbondprozessen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 336, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-55-7
- Bd. 337 PEITZ, C.: Systematik zur Entwicklung einer produktlebenszyklusorientierten Geschäftsmodell-Roadmap. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 337, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-56-4
- Bd. 338 WANG, R.: Integrated Planar Antenna Designs and Technologies for Millimeter-Wave Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 338, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-57-1
- Bd. 339 MAO, Y.: 245 GHz Subharmonic Receivers For Gas Spectroscopy in SiGe BiCMOS Technology. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 339, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-58-8
- Bd. 340 DOROCIĄK, R.: Systematik zur frühzeitigen Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 340, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-59-5
- Bd. 341 BAUER, F.: Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 341, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-60-1
- Bd. 342 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 12. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 342, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-61-8
- Bd. 343 GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-62-5
- Bd. 344 BRÖKELMANN, J.: Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 344, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-63-2
- Bd. 345 SHAREEF, Z.: Path Planning and Trajectory Optimization of Delta Parallel Robot. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 345, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-64-9